

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**



# **Estratégias para a otimização das condições de operação de redes HVDC Multi-Terminal**

**Nuno Miguel Lobo Guimarães**

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Carlos Moreira

22 de Julho de 2014



A Dissertação intitulada

**"Estratégias para a Otimização das Condições de Operação de Redes HVDC  
Multi-Terminal"**

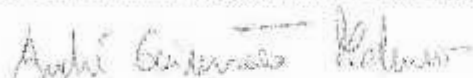
foi aprovada em provas realizadas em 17-07-2014

o júri



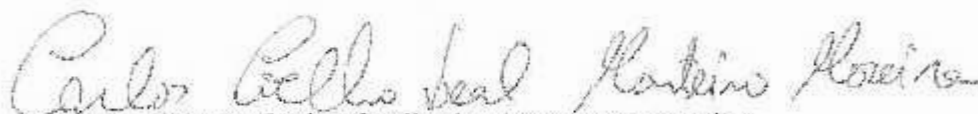
**Presidente Professor Doutor Carlos Manuel de Araújo Sá**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Professor Doutor André Guimarães Madureira**

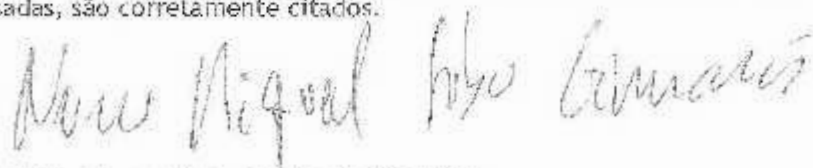
Professor Assistente da Universidade Lusófona



**Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



**Autor - Nuno Miguel Lobo Guimarães**

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Resumo

Com a necessidade de apostar em energia renovável de forma a garantir a sustentabilidade energética no futuro, surge a necessidade de procurar novos sítios para a construção de parques eólicos de produção de energia. Vários planos relativos ao desenvolvimento de redes elétricas, em resultado da necessidade de criar condições para a integração de parques eólicos *offshore*, têm vindo a ser estudados a nível Europeu.

Condicionalismos tecnológicos justificam a utilização de corrente contínua para a transmissão em alta tensão (HVDC) e conversores fonte de tensão (VSC) em oposição à utilização de soluções convencionais baseadas em corrente alternada (HVAC).

Aspetos relacionados com fiabilidade e flexibilidade de controlo de tensão têm fomentado o desenvolvimento de redes de corrente contínua Multi-Terminal (MTDC). A sua operação tem vindo a ser explorada com base em técnicas que exploram o conceito de controlo distribuído de tensão. Esse tipo de estratégia envolve uma metodologia de controlo em que o conversor associado a uma rede AC continental é controlado através de um estatismo que relaciona a tensão em cada barramento DC com a corrente ou potência que é injetada nesse mesmo barramento.

Importa portanto desenvolver metodologias que permitam a otimização das condições de operação destas redes através da minimização do valor das perdas.



# Abstract

With the need to invest in renewable energy to ensure energy sustainability in the future, the need arises to seek new places for the construction of wind farms to generate energy. Several plans for the development of electrical networks, as a result of the need to create conditions for the integration of offshore wind farms have been studied at European level.

Technological constraints justify the use of direct current for the high voltage transmission (HVDC) and voltage source converters (VSC) as opposed to using conventional solutions based on alternating current (HVAC).

Aspects related to reliability and flexibility of voltage control have encouraged the development of Multi-Terminal DC networks (MTDC). Its operation has been explored based on techniques that exploit the concept of distributed control voltage. This type of strategy involves a method of control in which the AC converter associated with a continental network is controlled by a voltage droop that relates voltage in each DC bus with the current or power that is injected on the same bus.

It is therefore important to develop methodologies that allows the optimization of the operating conditions of these networks by minimizing the loss.





# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Carlos Moreira, por todo o apoio e dedicação prestados no desenvolvimento desta dissertação. Estando presente em todos os momentos, manifestou uma enorme disponibilidade em ajudar e ao mesmo tempo manteve um espírito exigente e construtivo.

Às minhas origens. À minha família. Àqueles que me criaram, educaram e estarão sempre presentes. Aos meus avós. Aos meus pais. À minha Madrinha. Ao meu irmão.

A estes seis anos de faculdade dos quais vou sentir muitas saudades. A todos os meus amigos que me acompanharam até esta etapa final. A todos os momentos passados. À Catarina pela ajuda. Aos Ervilhinhas.

Esta dissertação é dedicada à minha avó, Teresa Rosa de Oliveira Lobo.

Nuno Guimarães



*“Sê todo em cada coisa. Põe quanto és  
No mínimo que fazes.”*

Ricardo Reis, in "Odes"  
Heterónimo de Fernando Pessoa



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento Geral . . . . .	1
1.2	Objetivos da Dissertação . . . . .	2
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	Produção de Energia Eólica . . . . .	5
2.2.1	Energia Eólica na Europa e no Mundo . . . . .	5
2.2.2	Energia Eólica em Portugal . . . . .	7
2.2.3	Produção Eólica <i>Offshore</i> . . . . .	9
2.2.4	Produção Eólica <i>Offshore</i> em Portugal . . . . .	12
2.2.5	Tecnologia de Produção Eólica . . . . .	12
2.3	Ligação dos Parques Eólicos às Redes Continentais . . . . .	14
2.3.1	Sistemas de Transmissão em Alta Tensão e Corrente Alternada (HVAC) . . . . .	14
2.3.2	Sistemas de Transmissão em Alta Tensão e Corrente Contínua (HVDC) . . . . .	16
2.3.3	Comparação Entre HVAC, HVDC LCC e HVDC VSC . . . . .	20
2.4	Transmissão <i>Multi-terminal</i> em Corrente Contínua MTDC . . . . .	21
2.4.1	Conversores VSC . . . . .	22
2.4.2	Operação e Controlo dos Conversores de uma rede MTDC . . . . .	23
2.5	Conclusões . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Modelização de uma Rede de Transmissão HVDC Multi-Terminal</b>	<b>27</b>
3.1	Introdução . . . . .	27
3.2	Considerações sobre redes em corrente contínua . . . . .	27
3.2.1	Topologias de uma rede MTDC . . . . .	27
3.2.2	Modelo da Rede DC . . . . .	28
3.3	Métodos de Controlo de uma Rede MTDC . . . . .	30
3.3.1	Barramento de Referência . . . . .	30
3.3.2	Controlo <i>Droop</i> da Tensão . . . . .	30
3.4	Trânsito de Potências numa Rede Multi-Terminal . . . . .	32
3.4.1	Rede de Transmissão MTDC . . . . .	32
3.4.2	Construção da Matriz das Admitâncias Nodais . . . . .	33
3.4.3	Método de <i>Gauss Seidel</i> . . . . .	34
3.4.4	Problema de Trânsito de Potências em Controlo <i>Droop</i> de Tensão . . . . .	35
3.4.5	Aplicação Numérica em Regime Permanente . . . . .	36
3.4.6	Conclusão . . . . .	38

<b>4</b>	<b>Formulação de Estratégias de Otimização numa Rede MTDC</b>	<b>41</b>
4.1	Introdução . . . . .	41
4.2	Algoritmo Evolucionário de Otimização (EPSO) . . . . .	41
4.2.1	Modelo Básico . . . . .	42
4.2.2	Definição da Função Objetivo . . . . .	43
4.2.3	Exemplo de Teste para uma Simulação . . . . .	45
4.3	Modelo de Otimização em Controlo por Barramento de Referência . . . . .	46
4.4	Modelo de Otimização em Controlo <i>Droop</i> da Tensão . . . . .	46
4.5	Conclusão . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Solução e Resultados das Simulações</b>	<b>49</b>
5.1	Introdução . . . . .	49
5.2	Casos de Estudo . . . . .	49
5.2.1	Redes de teste . . . . .	49
5.2.2	Diagramas de Produção e Potência Especificada . . . . .	50
5.3	Simulação com Potência Especificada no Barramento 4 Constante . . . . .	51
5.4	Simulação com Potência Especificada no Barramento 4 Variável . . . . .	53
5.4.1	Resultados para a Estratégia de Barramento de Referência . . . . .	53
5.4.2	Resultados para a Estratégia de Controlo <i>Droop</i> de Tensão . . . . .	59
5.4.3	Comparação entre as duas Estratégias de Controlo . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>67</b>
6.1	Conclusões . . . . .	67
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	69
	<b>Referências</b>	<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Dados da Rede MTDC</b>	<b>73</b>
A.1	Bases do Sistema . . . . .	73
A.2	Conversores e Cabos DC . . . . .	73

# Lista de Figuras

2.1	Capacidade total de energia eólica instalada no mundo desde 1996 até 2012[4]. .	6
2.2	Os 10 maiores países produtores mundiais de energia eólica. Capacidade instalada em 2011 e reforçada em 2012 [4] . . . . .	6
2.3	Os 10 maiores fabricantes mundiais de turbinas eólicas [4] . . . . .	7
2.4	Capacidade instalada e em construção de parques de produção eólica desde 1996 até 2012 em Portugal [6] . . . . .	8
2.5	Localização da capacidade eólica instalada no país [6] . . . . .	9
2.6	Capacidade Instalada de parques de produção <i>offshore</i> em cada ano (eixo da direita) e o respetivo acumulado (eixo da esquerda) [2] . . . . .	10
2.7	Total de Capacidade instalada <i>offshore</i> dos países Europeus em 2013[7] . . . . .	10
2.8	Distribuição da capacidade total instalada <i>offshore</i> por mar[7] . . . . .	11
2.9	Projetos a implementar até 2030 e evolução da capacidade instalada por país[8] .	11
2.10	<i>Wind Float</i> , gerador <i>offshore</i> , com capacidade de 2 MW, numa parceria entre a EDP e a Vestas[9] . . . . .	12
2.11	Esquema unifilar de um aerogerador de indução duplamente alimentado, DFIG [3]	13
2.12	Esquema unifilar de um aerogerador de indução com rotor em gaiola de esquilo, SCIG [3] . . . . .	13
2.13	Esquema unifilar de um aerogerador síncrono de ímanes permanentes [3] . . . .	14
2.14	Configuração básica de uma rede de transmissão HVAC ligada a um parque eólico de 600 MW [3] . . . . .	15
2.15	Cabo submarino HVAC XLPE [13] . . . . .	15
2.16	Perdas em transmissão HVAC para diferentes distâncias e potencia a transmitir [14]	16
2.17	Cabo submarino HVDC XPLE [13] . . . . .	17
2.18	Topologias de rede de transporte [16]. . . . .	17
2.19	Configuração básica de um parque produtor de 500 MW que usa a tecnologia de transmissão HVDC-LCC com um sistema STATCOM. Nota: F = filtro; HFF = Filtro passa alto; O sistema de STATCOM pode ser substituído por um gerador a diesel [3]. . . . .	18
2.20	Ligação HVDC bipolar de um parque eólico com capacidade de 600 MW, distribuído por duas estações conversoras de 300 MW cada [3]. . . . .	19
2.21	Perdas em função da distância para tecnologias HVDC e HVAC [3]. . . . .	20
2.22	Configuração de uma rede de transmissão MTDC com tecnologia conversora HVDC VSC[20]. . . . .	21
2.23	Esquema de um conversor VSC, do lado <i>offshore</i> [21]. . . . .	22
2.24	Esquema de um conversor VSC do lado <i>onshore</i> , em modo de <i>Droop Control</i> [21].	23
2.25	Caraterística de tensão e corrente para os três modos de operação de um conversor <i>offshore</i> [20]. . . . .	24

3.1	Topologias de rede de transporte [22]. . . . .	28
3.2	Modelo em $\pi$ de uma linha de transmissão, configuração monopolar[23]. . . . .	28
3.3	Controlo <i>Droop</i> da tensão em função da potência na estação conversora, para duas estações com diferentes potências nominais. . . . .	31
3.4	Esquema da rede de transmissão DC utilizada neste trabalho. . . . .	32
3.5	Resultados dos dois testes realizados para a estratégia de controlo <i>Droop</i> da tensão. . . . .	38
4.1	Ilustração da reprodução de uma partícula no EPSO. Uma partícula $i$ localizada em $X$ , numa iteração ( $k$ ), origina um descendente na iteração ( $k + 1$ ), sob a influência dos três termos de inércia, memória e cooperação. Relativamente a este último termo, a atracção efetua-se para uma vizinhança definida por uma distribuição Gaussiana do ótimo corrente $b_G$ . [25]. . . . .	43
4.2	Evolução da função <i>Fitness</i> de minimização das perdas do sistema ao longo de 350 iterações. . . . .	45
4.3	Evolução do valor da partícula referente à tensão no barramento 3 e das tensões nos restantes barramentos do sistema de transmissão (1, 2 e 4) . . . . .	46
5.1	Esquema da segunda rede de transmissão DC utilizada neste trabalho, adaptada de [22]. . . . .	50
5.2	Produção eólica nos 3 parques eólicos offshore, durante um dia. . . . .	50
5.3	Produção de energia eólica <i>offshore</i> em cada rede e potência especificada no barramento 4. . . . .	51
5.4	Valor ótimo da tensão de referência durante o período de 24h simulado. . . . .	52
5.5	Nível de tensão ótimo nos 4 barramentos da rede durante o período de 24h simulado. . . . .	52
5.6	Potência no barramento de referência durante o período de 24h simulado. . . . .	53
5.7	Valor ótimo da tensão de referência durante o período de 24h com potência especificada em 4 variável. . . . .	54
5.8	Nível de tensão nos 4 barramentos da rede durante o período de 24h com potência especificada em 4 variável. . . . .	54
5.9	Potência no barramento de referência durante o período de 24h com potência especificada em 4 variável. . . . .	55
5.10	Valor ótimo da tensão de referência na <i>rede 2</i> durante o período de 24h para as duas simulações efetuadas, com a potência no barramento 4 variável. . . . .	56
5.11	Níveis de tensão nos barramentos 1,2,4 e 5 da <i>rede 2</i> durante o período de 24h para as duas simulações efetuadas, com a potência no barramento 4 variável. . . . .	57
5.12	Níveis de tensão nos barramentos da <i>rede 2</i> , para a melhor simulação, durante o período de 24h, com a potência no barramento 4 variável. . . . .	57
5.13	Potência no barramento 3 da <i>rede 2</i> durante o período de 24h para as duas simulações efetuadas, com a potência no barramento 4 variável. . . . .	58
5.14	Comparação entre os valores ótimos das redes 1 e 2 durante o período de 24h e para a estratégia de controlo por Barramento de Compensação, com a potência no barramento 4 variável. . . . .	58
5.15	Resultados obtidos para os níveis de tensão nos barramentos 3 e 4 controlados por <i>droop</i> durante o período de 24h, para a <i>rede 1</i> . . . . .	60
5.16	Níveis de tensão nos barramentos da <i>rede 1</i> , para a estratégia de controlo <i>droop</i> de tensão nos barramentos <i>onshore</i> durante o período de 24h, com a potência no barramento 4 variável. . . . .	60
5.17	Resultados obtidos para os níveis de tensão nos barramentos 3 e 4 controlados por <i>droop</i> durante o período de 24h, para a <i>rede 2</i> . . . . .	62



5.18	Níveis de tensão nos barramentos 1,2 e 5 da <i>rede 2</i> , para a estratégia de controlo <i>droop</i> de tensão nos barramentos <i>onshore</i> durante o período de 24h, com a potência no barramento 4 variável. . . . .	63
5.19	Comparação entre os valores ótimos das redes 1 e 2 durante o período de 24h e para a estratégia de controlo <i>droop</i> de tensão, com a potência no barramento 4 variável. . . . .	63
5.20	Comparação das perdas nas duas estratégias de controlo para cada uma das redes de teste. . . . .	64
5.21	Comparação os níveis médios de tensão nas duas estratégias de controlo para cada uma das redes de teste. . . . .	65



# Lista de Tabelas

3.1	Variáveis de entrada (VE) e de saída (VS) do problema de trânsito de potências. .	33
3.2	Tensões nodais para a simulação de controlo por barramento de referência. . . . .	37
3.3	Trânsito de potências na simulação de controlo por barramento de referência. . .	37
3.4	Tensões nos barramentos em controlo <i>droop</i> de tensão. . . . .	37
3.5	Trânsito de potências em controlo <i>droop</i> de tensão. . . . .	38
5.1	Valor mínimo das perdas, na estratégia de controlo por barramento de compensação com o valor da potência especificada no ponto 4 constante ao longo das 24h, para a <i>rede 1</i> . . . . .	51
5.2	Valor mínimo das perdas, na estratégia de controlo por barramento de compensação com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a <i>rede 1</i> . . . . .	53
5.3	Valor mínimo das perdas para a primeira simulação, na estratégia de controlo por barramento de compensação com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a <i>rede 2</i> . . . . .	55
5.4	Valor mínimo das perdas para a segunda simulação, na estratégia de controlo por barramento de compensação com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a <i>rede 2</i> . . . . .	56
5.5	Valor mínimo das perdas na estratégia de controlo <i>droop</i> de tensão nos barramentos 3 e 4, com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a <i>rede 1</i> . . . . .	59
5.6	Valor mínimo das perdas na estratégia de controlo <i>droop</i> de tensão nos barramentos 3 e 4, com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a <i>rede 2</i> . . . . .	61
A.1	Bases do sistema em p.u das redes MTDC. . . . .	73
A.2	Parâmetros das estações conversoras. . . . .	73
A.3	Características físicas dos cabos. . . . .	73
A.4	Carateristicas das linhas para a <i>rede 1</i> . . . . .	74
A.5	Carateristicas das linhas para a <i>rede 2</i> . . . . .	74



# Abreviaturas e Símbolos

DC	<i>Direct Current</i> , Corrente Contínua
AC	<i>Alternating Current</i> , Corrente Alternada
HVAC	<i>High-Voltage Alternating Current Transmission</i> , Transmissão em Corrente Alternada
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current Transmission</i> , Transmissão em Corrente Contínua
HVDC-LCC	<i>High-Voltage DC using Line Commutated Conversion</i> , Transmissão em Corrente Contínua com Conversores de Comutação Natural de Linha
HVDC-VSC	<i>High-Voltage DC using Voltage Source Converters</i> , Transmissão em Corrente Alternada com Conversores de Comutação Forçada
MTDC	<i>Multi-Terminal Direct Current</i> , Redes de Transmissão Multi-Terminal em Corrente Contínua
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistors</i> , Transístor Bipolar de Porta Isolada
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> , Modulação por Largura de Impulso
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i> , Compensador Síncrono Estático
XLPE	Polietileno Reticulado



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento Geral

A energia é hoje um bem praticamente indispensável para a sociedade. A sua importância a nível industrial e socioeconómico é tal que é impossível planear um dia sem recorrer a este recurso. É importante que a produção de energia elétrica seja suficiente para garantir o quotidiano tanto das pessoas como das atividades económicas e para além disso é importante que a sua transmissão garanta certos padrões de qualidade e segurança.

Deste modo a produção de energia elétrica recorrendo a combustíveis fósseis torna-se cada vez mais insustentável. Do ponto de vista ambiental estes combustíveis são poluentes, contribuem para o efeito de estufa e aquecimento global, diminuem a camada de ozono e provocam ainda chuvas ácidas. Estes combustíveis são ainda esgotáveis e não renováveis, portanto existe uma preocupação crescente em procurar alternativas.

Existe o objetivo Europeu de até 2020, reduzir em 20% as emissões de gases poluentes e aumentar em 20% a produção de energia renovável [1]. Sendo assim justifica-se que o interesse em estratégias renováveis tem aumentado no decorrer dos últimos anos. O principal foco tem sido na produção de energia eólica mas existe também a hídrica, a geotérmica, a solar, entre outras.

O vento não é um recurso descoberto recentemente. A sua utilização, associada a moinhos, é secular e desempenhou funções no passado como bombagem de água nos Países Baixos ou moagem de cereais no Mediterrâneo. Mais recentemente estas estruturas foram-se extinguindo e o vento ganhou uma nova importância na produção de energia elétrica, associado a turbinas.

O investimento na construção de parques eólicos de produção de energia elétrica tem sido grande nos últimos anos. Na Europa em 2010 existia 80GW de capacidade instalada e é expectável que em 2020 essa capacidade atinja os 230GW[2]. O índice de construção tem sido tão elevado que se começaram a procurar novos sítios onde construir parques eólicos, visto que o espaço continental está cada vez mais ocupado.

A expansão para plataformas marítimas é uma solução para o problema de ocupação terrestre. Nos oceanos existe mais espaço onde construir parques eólicos em grande escala e ainda é possível usufruir de uma maior intensidade do vento registada nestas zonas. A energia é produzida num

ponto *offshore* e é transmitida até à rede AC continental. Esta transmissão é feita entre distâncias maiores do que quando a energia é produzida em pontos terrestres, o que aumenta o custo do investimento e o valor das perdas associadas ao transporte.

Inicialmente foram implementadas ligações a curtas distâncias, através de sistemas de transmissão em corrente alternada (HVAC). Esta tecnologia tem como grande desvantagem as perdas e o desequilíbrio entre as tensões nos barramentos, provocadas pelo aumento considerável de potência reativa nos cabos [3]. Esta tecnologia é a mais utilizada na transmissão de energia atualmente mas os avanços na eletrónica de potência tornam a solução de transmissão em corrente contínua (HVDC), na mais interessante.

Na tecnologia de transmissão HVDC utilizam-se dois cabos numa ligação bipolar, menos um do que na transmissão em AC. Em termos de perdas, a grande parte encontra-se nos conversores *onshore* e *offshore* que fazem a ligação entre a rede de DC e os pontos de produção e continentais, ambos em AC. Ainda assim a partir de uma certa distância esta tecnologia apresenta um valor de perdas inferior à tecnologia HVAC.

Inicialmente surgiram os conversores HVDC-LCC (*Line Commutated Converter*), baseados em válvulas de tiristores que controlam a tensão da rede quando são associados a um dispositivo STATCOM. É uma solução limitada visto que necessita de energia reativa para as válvulas e gera harmónicos para o circuito. A mais recente tecnologia, HVDC-VSC (*Voltage Source Converter*), baseada em IGBT's em série, já possui o controlo de tensão e controla ainda a injeção e consumo de energia reativa graças à modulação por largura de impulso(PWM).

Ligações ponto a ponto são as mais simples e têm sido as mais implementadas. A ligação faz-se entre dois pontos AC assíncronos mas esta topologia apresenta muitas limitações do ponto de vista de fiabilidade. A alternativa em fase de estudo mas com enormes perspetivas futuras é a rede Multi-Terminal DC (MTDC). Estas redes permitem um maior aproveitamento de energia e são melhores do ponto de vista de fiabilidade e flexibilidade de operação do sistema.

Existem duas estratégias de controlo de redes MTDC, barramento de compensação e controlo *droop* de tensão. Dado a implementação destas redes num futuro próximo, torna-se decisivo conhecer as suas estratégias de controlo e definir estratégias de otimização que melhorem as condições de operação destas redes, minimizando o valor das perdas.

## 1.2 Objetivos da Dissertação

Com esta dissertação pretende-se primeiramente compreender os princípios de funcionamento de uma rede HVDC e a sua evolução para redes MTDC. De seguida pretende-se identificar os mecanismos de controlo que estas redes possibilitam e perceber o seu funcionamento.

Caracterizados e identificados os mecanismos e componentes de uma rede deste género, importa perceber o modelo deste tipo de redes e ainda o modelo do trânsito de potências utilizado.

De seguida formulam-se estratégias de otimização e define-se a função objetivo para o problema de minimização das perdas. Este problema vai ser validado em duas redes de teste e os



resultados obtidos vão ajudar a perceber as diferenças entre o valor das perdas e níveis de tensões para as estratégias de controlo das redes MTDC.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Para além deste capítulo introdutório, esta dissertação conta com mais 5 capítulos. Em 2 é realizado um histórico sobre a produção de energia eólica em Portugal e no mundo e é feita uma revisão sobre alguns conceitos importantes sobre produção *offshore* e redes de transmissão HVAC e HVDC.

No terceiro capítulo, em 3, a transmissão em corrente contínua é abordada e ainda é modelizado o problema de trânsito de potências para cada uma das estratégias de controlo. No quarto capítulo, em 4, é formulada a função objetivo e explicado o algoritmo de otimização e a sua adaptação a cada uma das estratégias.

No quinto capítulo, 5, são apresentadas as duas redes de teste e são expostos os resultados de todas as simulações efetuadas. Em 6 são feitas as conclusões e apresentadas propostas de trabalho futuras.



## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Introdução

Neste capítulo começa-se por apresentar, na secção 2.2, o panorama da produção de energia eólica na Europa e no Mundo, assim como a sua evolução ao longo dos anos e perspectivas de futuro. De forma a perceber, não só a importância da produção eólica, mas o porquê da escolha do mar como o próximo destino a explorar.

Na secção 2.3, fala-se das tecnologias de transmissão existentes, conversores utilizados, e comparam-se as alternativas no sentido de perceber qual será melhor para integrar numa rede de corrente contínua (MTDC).

Na secção 2.4 faz-se a distinção entre os conversores do lado *onshore* e *offshore* e apresentam-se os seus modos de controlo.

### 2.2 Produção de Energia Eólica

#### 2.2.1 Energia Eólica na Europa e no Mundo

Recorrendo á figura 2.1 é possível observar que tem havido um investimento crescente no reforço da produção de energia eólica em todo o mundo [4]. Na Europa existe o compromisso de em 2020, se reduzir em 20% as emissões e o consumo de energia primária e também aumentar em 20% a produção de energia renovável[1]. Em 2010 o valor da capacidade instalada na Europa era de 80 GW, sendo expectável esse valor atinja os 230 GW (190 GW *onshore* e 40 GW *offshore*) em 2020 e os 400 GW (250 GW *onshore* e 150 GW *offshore*) em 2030 [2].

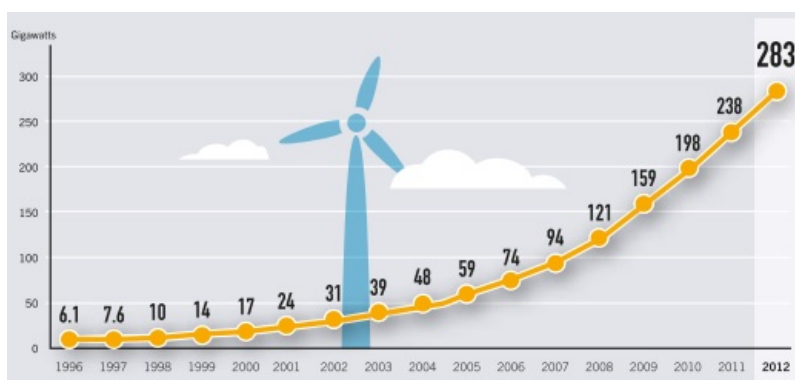


Figura 2.1: Capacidade total de energia eólica instalada no mundo desde 1996 até 2012[4].

Do gráfico da figura 2.2 retira-se que a China, com uma capacidade de cerca de 75 GW (13 GW adicionados em 2012) e os Estados Unidos, com uma capacidade instalada de 60 GW (13.1 GW adicionados em 2012) lideram a produção mundial, seguidos do continente Europeu. Isto reflete uma aposta crescente na exploração deste recurso a nível global, sendo que a produção destes três representa cerca de 87% da energia eólica produzida em todo o mundo.[5].

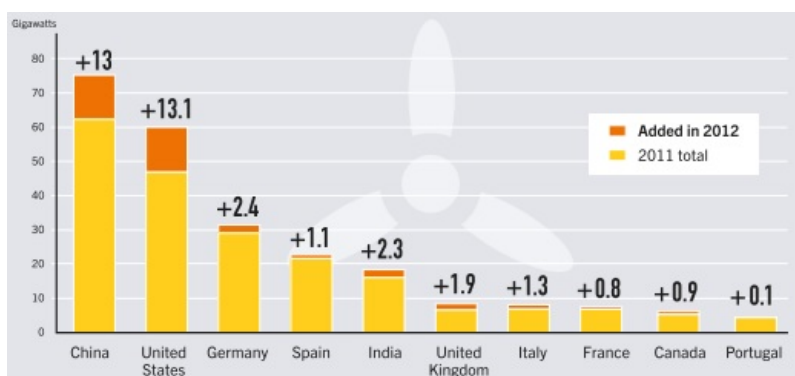


Figura 2.2: Os 10 maiores países produtores mundiais de energia eólica. Capacidade instalada em 2011 e reforçada em 2012 [4]

A capacidade de produção eólica seria capaz de alimentar até 3% da procura de energia elétrica mundial. Na Europa esse valor subiria para 7% da procura, num ano considerado normal. O aproveitamento eólico em alguns países Europeus é tão eficiente que na Dinamarca, no ano de 2012, a energia eólica conseguiu cobrir 30% do consumo de energia elétrica do país. Outro país com um grande aproveitamento eólico é Portugal, que em 2012 conseguiu cobrir 20% da procura de energia através da produção de energia eólica [4].

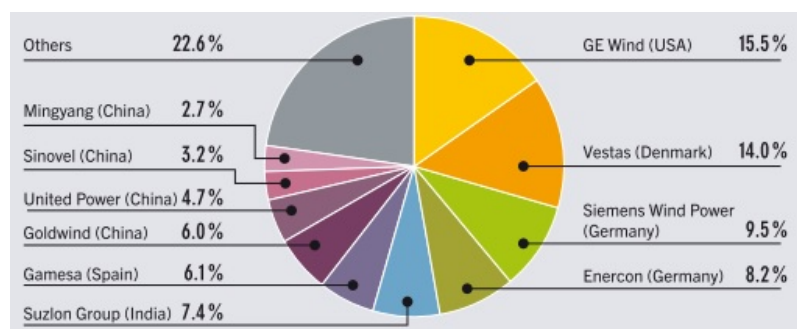


Figura 2.3: Os 10 maiores fabricantes mundiais de turbinas eólicas [4]

Na figura 2.3, é possível observar que nos 10 maiores fabricantes de turbinas eólicas, que cobrem mais de 75% do mercado, se encontram 4 empresas europeias. A empresa dinamarquesa, Vestas, liderava o mercado mundial desde 2000 mas em 2011 foi ultrapassada pelo maior fabricante americano, GE Wind. A alemã Siemens tem vindo a progredir imenso nos últimos tempos e ocupa a terceira posição da lista [4].

### 2.2.2 Energia Eólica em Portugal

Em Portugal, desde 2005 existiu um forte investimento no aumento de capacidade de energia eólica. Neste momento a construção encontra-se praticamente estagnada por falta de locais rentáveis onde construir novas instalações. De qualquer forma, todo o investimento feito anteriormente permite a Portugal ter o segundo maior índice de penetração de toda a Europa, apenas ultrapassado pela Dinamarca [2].

Segundo o gráfico da figura 2.4 a capacidade instalada em 2012 ultrapassava os 4500 MW mesmo com um índice de construção quase inexistente desde 2011.

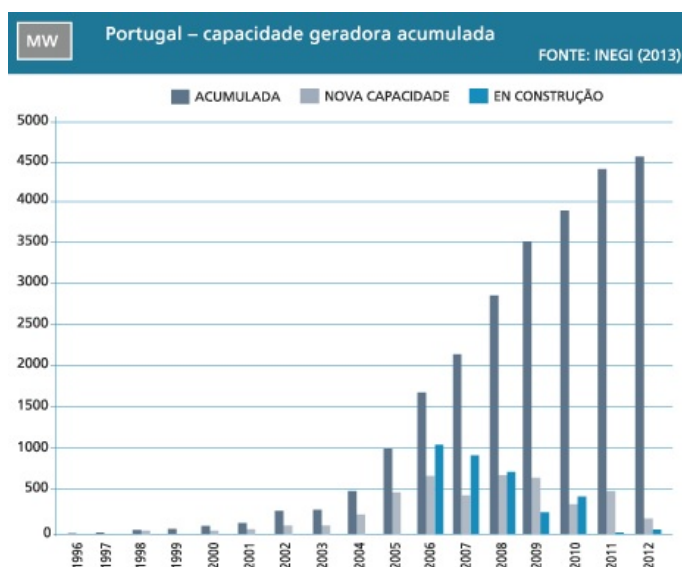


Figura 2.4: Capacidade instalada e em construção de parques de produção eólica desde 1996 até 2012 em Portugal [6]

Grande parte desta capacidade encontra-se instalada a norte do país, beneficiando de uma maior intensidade e regularidade do vento nas zonas altas [6]. Como é demonstrado na figura 2.5, existe uma grande densidade de parques nas zonas altas do interior. No litoral não existe grande capacidade instalada devido à elevada ocupação populacional nessa zona do território.

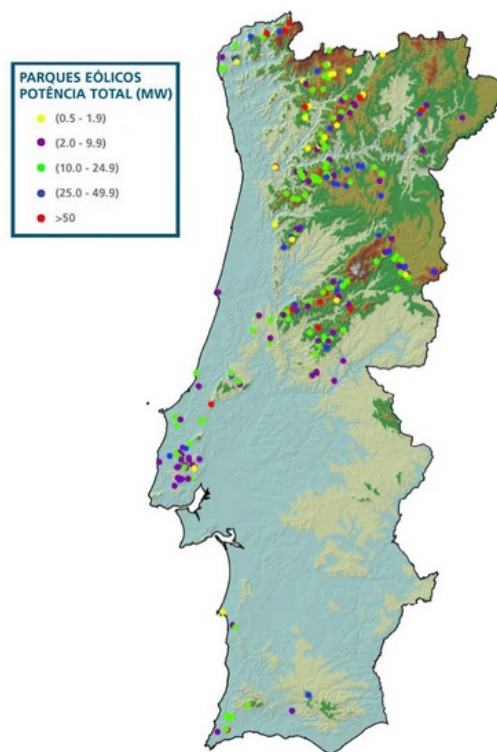


Figura 2.5: Localização da capacidade eólica instalada no país [6]

### 2.2.3 Produção Eólica *Offshore*

De forma a expandir a produção de energia eólica é necessário procurar novos lugares onde instalar. A ocupação terrestre tem vindo a aumentar e por isso é necessário procurar alternativas, expandindo a ideia de infraestrutura da rede. A produção de energia num ponto distante da costa marítima é uma alternativa já a ser implementada e com diversos projetos para o futuro.

Existe um alvo de 40 GW de produção *offshore* na Europa a atingir em 2020 e de 150 GW em 2030[2]. Parece uma meta um pouco ambiciosa, em 2013 a capacidade instalada é inferior a 7 GW[7], mas projetos para a instalação de 100 GW, propostos e alguns já em fase de desenvolvimento mostra que estas metas são perfeitamente alcançáveis. Estes 100 GW irão responder entre 8.7% a 11% da procura de energia elétrica na Europa, contribuindo para a redução de cerca de 202 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>[2]. A figura 2.6 mostra a capacidade instalada, a nível mundial, de parques de produção eólica até ao momento uma perspetiva de futuro.

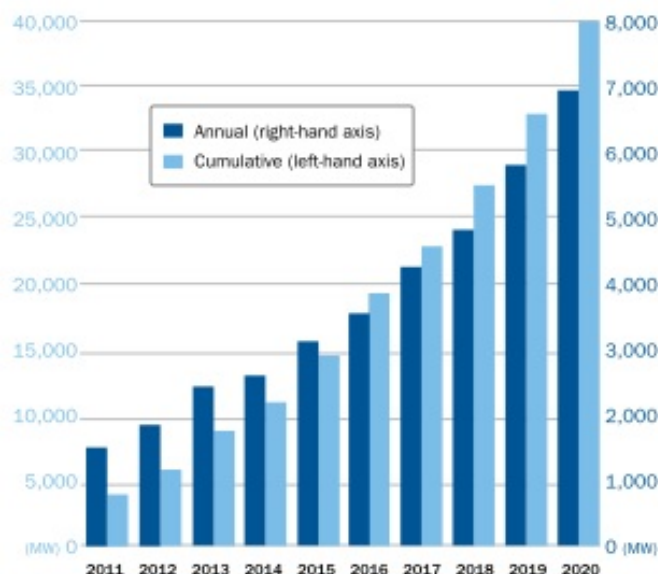


Figura 2.6: Capacidade Instalada de parques de produção *offshore* em cada ano (eixo da direita) e o respetivo acumulado (eixo da esquerda) [2]

Na figura 2.7 é possível observar os países que atualmente possuem capacidade instalada na Europa, com a Dinamarca, com 1271 *MW* instalados (513 turbinas), e o Reino Unido, com 3681 *MW* (1082 turbinas), a terem a grande maioria da capacidade instalada do continente[7].

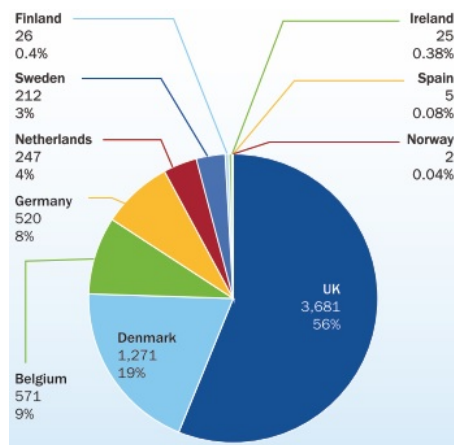


Figura 2.7: Total de Capacidade instalada *offshore* dos países Europeus em 2013[7]

Conforme a figura 2.8, os mares do Norte e Báltico têm sido os locais mais explorados em termos de implementação de energia *offshore*.

A pouca profundidade do mar e a abundância de vento na região, são fatores que favorecem o investimento.



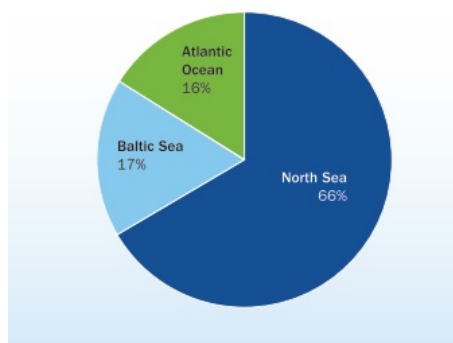


Figura 2.8: Distribuição da capacidade total instalada *offshore* por mar[7]

No Oceano Atlântico esta tecnologia ainda se encontra em fase de estudo devido, em grande parte, às características geológicas do local.

Os fabricantes de turbinas, Gamesa, implementaram um projeto *offshore* de teste na Grã-Canária que é composto por uma turbina de 5MW de potência nominal. Esta zona foi escolhida devido à abundância e regularidade do vento e também por se encontrar relativamente próxima da fábrica da Gamesa em Espanha, onde a turbina foi construída.

Em Portugal também existe um protótipo inovador em estudo com uma turbina de 2MW, que é explicado com mais detalhe na secção 2.2.4

A nível Europeu existem já diversos projetos prontos a implementar ou à espera de confirmação. Na figura 2.9 podemos ver o que está projetado para 2020 e 2030 no norte da Europa e o valor das respetivas capacidades instaladas por país.

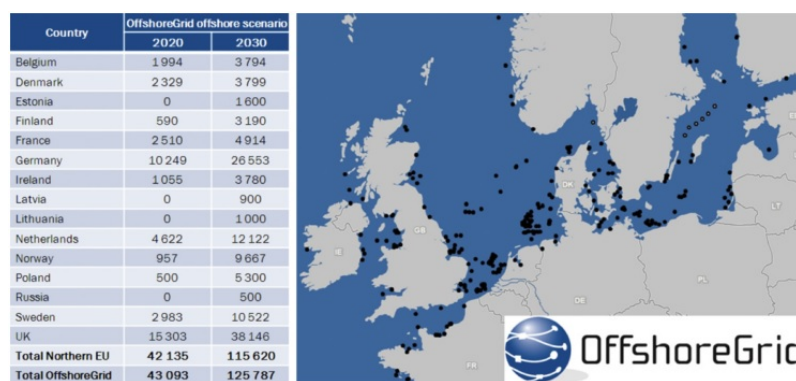


Figura 2.9: Projetos a implementar até 2030 e evolução da capacidade instalada por país[8]

Todos os países da zona do mar do Norte, e do Báltico vão realizar enormes investimentos de forma a potenciar esta zona em termos energéticos. O Norte da Europa vai então possuir cerca de 42 GW dos 43 GW de todo o continente em 2020, e em 2030 vai ter 115 GW dos 125 GW totais[8]. Estes resultados confirmam esta zona como a mais potenciada do continente.

## 2.2.4 Produção Eólica *Offshore* em Portugal

Em Portugal esta tecnologia ainda está numa fase muito experimental. O solo da costa portuguesa, ao contrário do solo no Norte da Europa, aprofunda muito rapidamente para valores superiores a 50 *m*. Uma consequência desta elevada profundidade é que as estruturas habituais que se sustentam no solo são de difícil aplicação.

A EDP, numa parceria com a Dinamarquesa Vestas, trabalhou na construção de uma alternativa inovadora, construída em Portugal, que se baseia numa plataforma flutuante que sustenta o gerador eólico (*Wind Float*), figura 2.10 [9].

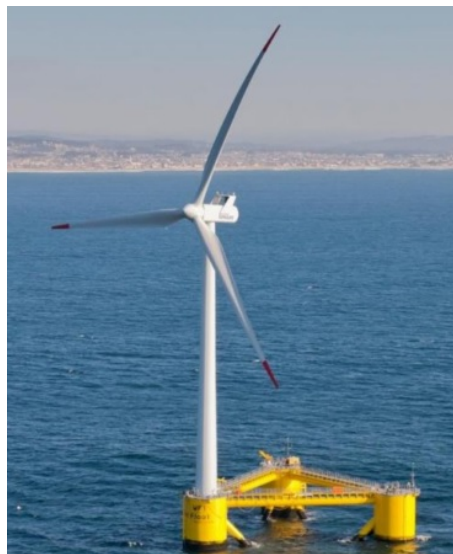


Figura 2.10: *Wind Float*, gerador *offshore*, com capacidade de 2 *MW*, numa parceria entre a EDP e a Vestas[9]

Esta turbina é de geração *offshore*, tendo uma capacidade de 2 *MW* e está situada a 6 *km* da costa a uma profundidade próxima dos 50 *m*. Este sistema tem outra vantagem de poder ser construído em terra e rebocado até ao local de instalação. Este projeto encontra-se instalado junto à costa da Póvoa de Varzim, constituindo um investimento perto dos 23 Milhões de Euros e desde a sua instalação em Dezembro de 2011 já produziu mais de 3 *GWh* de energia. Este projeto ainda se encontra em fase de testes, mas a EDP tem o objetivo de instalar futuramente um parque *offshore* de 150 *MW* [9].

## 2.2.5 Tecnologia de Produção Eólica

Em produção *offshore* utilizam-se preferencialmente aerogeradores de velocidade variável, de forma a aproveitar ao máximo as variações da intensidade do vento. Atualmente existem três aerogeradores no mercado de produção *offshore*, sendo dois de velocidade variável e um de velocidade fixa:

- Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG – *Double Fed induction Generator*)

- Gerador de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo (SCIG – *Squirrel Cage Induction Generator*)
- Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes (PMSG – *Permanent Magnet Synchronous Generator*).

Os aerogeradores DFIG, são amplamente utilizados em exploração eólica representando cerca de 50% do mercado energético [10]. Estes geradores possuem o estator diretamente ligado à rede e o rotor através de um conversor de potência [3], figura 2.11.

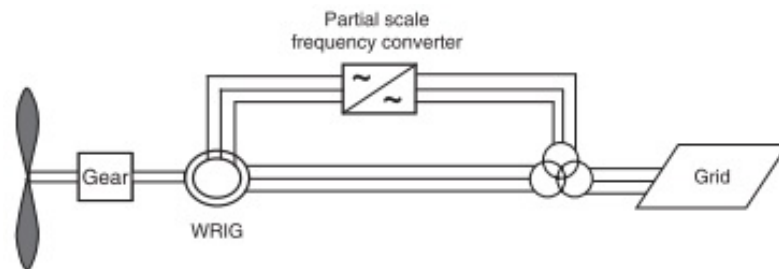


Figura 2.11: Esquema unifilar de um aerogerador de indução duplamente alimentado, DFIG [3]

O conversor é responsável pelo desacoplamento parcial entre frequência da rede e do gerador, possibilitando o controlo da velocidade de rotação em frações de 30% da velocidade de sincronismo [10].

O aerogerador SCIG é um sistema de conversão eólica a velocidade fixa. Como se pode ver pela figura 2.12, tal como a tecnologia DFIG necessita de caixa de velocidades e ainda de um sistema limitador da corrente de arranque (*Soft-Starter*) e compensação de energia reativa através de um banco de condensadores.

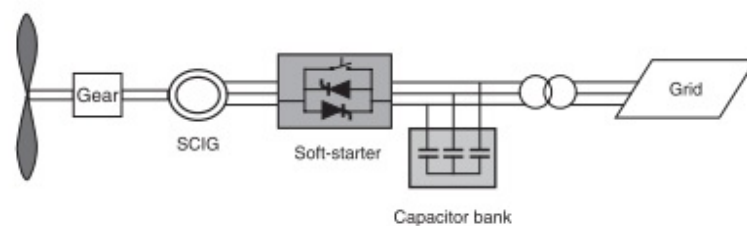


Figura 2.12: Esquema unifilar de um aerogerador de indução com rotor em gaiola de esquilo, SCIG [3]

Em relação aos aerogeradores DFIG, são aparelhos mais robustos, simples e necessitam de menor manutenção por não possuírem escovas que se desgastam com o tempo [10].

Os geradores PMSG são considerados os mais promissores para energia eólica. Esta tecnologia utiliza máquinas síncronas de excitação separada ou de ímanes permanentes, sem necessitar de caixa de velocidades [3]. A figura 2.13 representa o seu esquema unifilar.

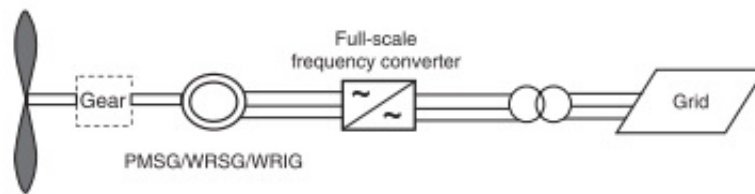


Figura 2.13: Esquema unifilar de um aerogerador síncrono de ímãs permanentes [3]

O gerador é ligado á rede através de um conversor (FSC - *Full-Scale Converter*) que assegura o desacoplamento total entre as frequências da rede e do gerador, permitindo alargar a gama operação do sistema para velocidades de vento reduzidas [11].

Mesmo sendo mais caros, maiores e mais pesados este tipo de tecnologia leva toda a vantagem em relação aos aerogeradores DFIG e serão os seus substitutos naturais. Num ambiente *offshore*, com um sistema PMSG, melhoramos em termos de fiabilidade reduzindo o número de operações de manutenção e melhoramos em termos ambientais visto que a caixa de velocidades derrama sempre óleo para o mar.

## 2.3 Ligação dos Parques Eólicos às Redes Continentais

A crescente ocupação terrestre com parques de produção eólica resulta na escassez, cada vez mais evidente, de locais onde instalar novos parques. Os oceanos surgem como uma solução para o problema, aliando o facto da velocidade do vento nestas zonas ser 10% superior à velocidade do vento na costa [3].

Existem duas tecnologias de transmissão, uma em corrente alternada (HVAC) e outra em corrente contínua (HVDC).

A tecnologia das turbinas faz com que a energia seja produzida em corrente alternada, portanto numa solução HVDC a energia tem de ser retificada para corrente contínua.

Nas secções a seguir encontram-se descritas as duas tecnologias existente e analisadas as diferenças entre elas.

### 2.3.1 Sistemas de Transmissão em Alta Tensão e Corrente Alternada (HVAC)

Até à data a transmissão em corrente alternada é a mais utilizada no transporte de energia produzida em *offshore*. Esta tecnologia segue os princípios da transmissão de energia em terra, fazendo uma interligação entre o parque eólico *offshore* e a rede AC Continental.

A figura 2.14. representa a configuração básica de um sistema de transporte, que tem como principais componentes:

- Subestação *Offshore*.
- Subestação *Onshore*.

- Cabo submarino HVAC XLPE, com três almas condutoras.

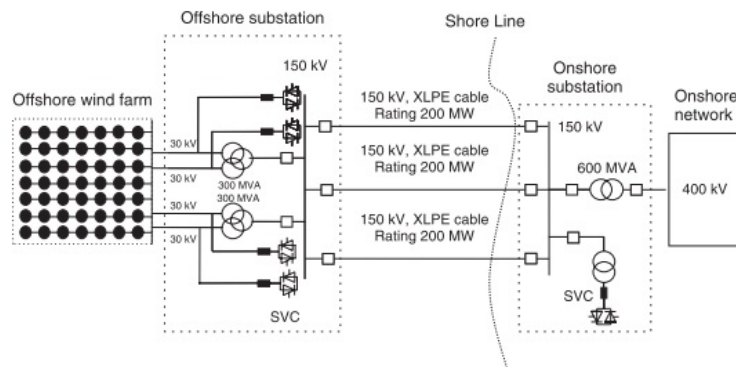


Figura 2.14: Configuração básica de uma rede de transmissão HVAC ligada a um parque eólico de 600 MW [3]

A subestação *offshore* possui um transformador responsável por elevar o nível de tensão, adequando-o ao transporte. É importante associar a esta subestação uma unidade responsável pela compensação de energia reativa, produzida nas capacidades *shunt* dos cabos XLPE em corrente alternada, como por exemplo um SVC (*Static Var Compensator*).

A subestação *onshore* pode necessitar de um transformador para adequar o nível da tensão de transporte ao nível da rede e para distâncias consideráveis convém também associar uma unidade de compensação de energia reativa. O funcionamento destas duas subestações é muito similar [3].

A transmissão é feita através de cabos submarinos HVAC que são constituídos por três condutores isolados em XLPE (Polietileno Reticulado) e ainda um condutor de fibra ótica. Como se pode ver na figura 2.15 este cabo é ainda protegido por uma armadura de aço e um isolamento em polipropileno [12].



Figura 2.15: Cabo submarino HVAC XLPE [13]

Para distâncias próximas da costa (<50 km) esta tecnologia apresenta um valor de perdas bastante favorável, o problema surge para distâncias consideráveis da costa, onde existem perdas de energia ativa significativas que tornam a solução desinteressante [14].

Na figura 2.16 podemos observar a evolução das perdas com a distância numa transmissão HVAC que utiliza compensação de reativa nas duas subestações.

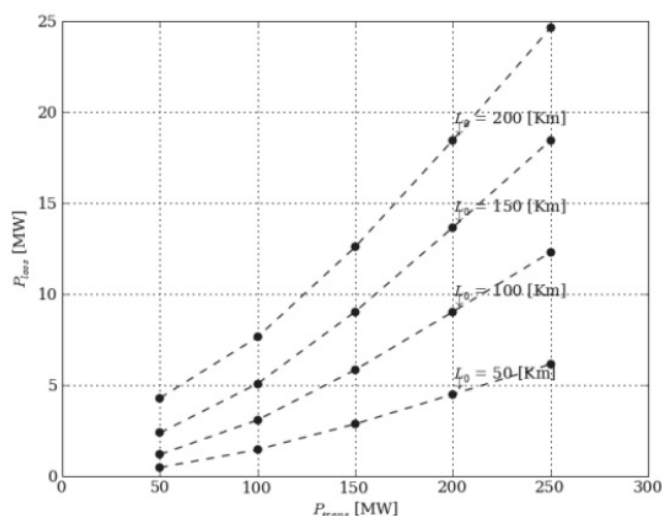


Figura 2.16: Perdas em transmissão HVAC para diferentes distâncias e potência a transmitir [14]

Como é possível comprovar pela figura, escolhendo uma potência a transmitir e aumentando a distância de transmissão o valor das perdas aumenta, assim como se para a mesma distância de transmissão, aumentarmos a potência a transmitir.

A produção de energia reativa é o principal fator penalizador desta tecnologia. O aumento da distância de transmissão provoca um aumento de potência reativa gerada nos cabos, originando desequilíbrios na tensão de ambos os terminais [15].

Este problema leva a que se tenha de equipar a subestação com mecanismos de compensação de energia reativa aumentando o tamanho e o investimento da mesma [14].

Na Dinamarca foi instalado um parque *offshore* a 21 km da costa (Horns Rev) com uma potência instalada de 160 MW. Este parque não possui compensação do lado *offshore* devido á curta distância a que se encontra da costa. Foi utilizado um cabo de 170 kV com três almas condutoras em cobre (XPLE), com 630 mm<sup>2</sup> de diâmetro cada [3].

### 2.3.2 Sistemas de Transmissão em Alta Tensão e Corrente Contínua (HVDC)

De forma a reduzir as perdas de transmissão para distâncias elevadas e melhorar os problemas de controlo dos níveis de tensão existentes em HVAC, surgem as estratégias de transmissão em corrente contínua (HVDC). Dentro deste modo de transmissão temos duas tecnologias, baseada em conversores com comutação natural de linha (LCC) e conversores com comutação forçada (VSC), baseados em IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

A figura 2.17 apresenta o cabo tipicamente utilizado na transmissão em corrente contínua. Trata-se de um cabo em tudo idêntico ao da transmissão em corrente alternada mas apenas com uma alma condutora de cobre com isolamento em XLPE e uma armadura de aço.



Figura 2.17: Cabo submarino HVDC XPLE [13]

Em termos de topologia da rede existe a configuração monopolar, na figura 2.18(a), utilizada para ligações a grandes distâncias como por exemplo, ligações marítimas. Quando a capacidade de transmissão excede a de um polo, optamos por uma configuração bipolar como na figura 2.18(b).

Uma configuração alternativa em que a energia pode ser transmitida para diferentes pontos assíncronos tem sido estudada. Esta ligação denomina-se de *Multi-Terminal* e a figura 2.18(c) representa um esquema exemplificativo.

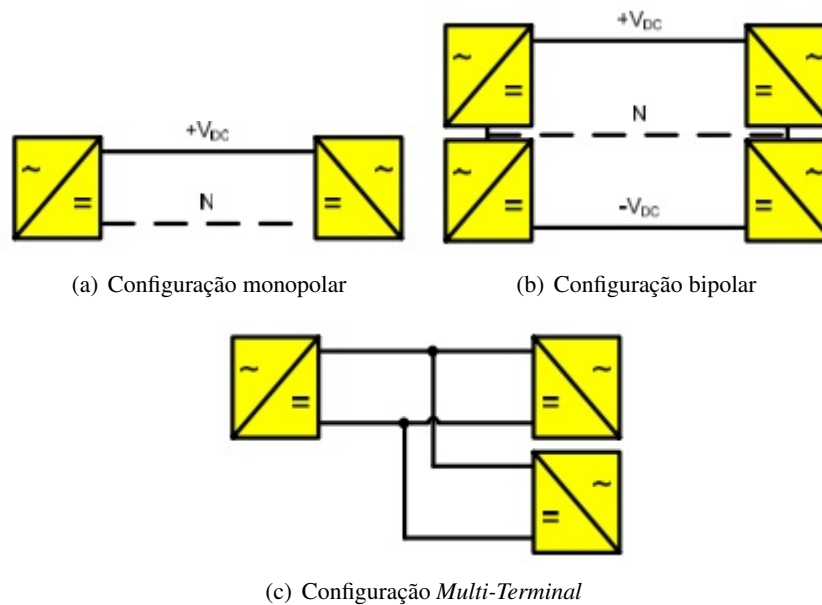


Figura 2.18: Topologias de rede de transporte [16].

As duas primeiras configurações são as mais utilizadas atualmente. Uma ligação *Multi-Terminal* permite conectar diferentes parques produtores a pontos continentais diferentes. Esta solução será um avanço enorme na ideia de criar uma grande rede continental interligada mas do ponto de vista de fiabilidade ainda é uma solução um pouco frágil.

A não existência de um disjuntor de corrente contínua, implementado no mercado, faz com que a proteção seja feita por disjuntores de corrente alternada, que atuam com a passagem do valor da corrente por zero. Estes disjuntores estão no lado AC da rede de transmissão, logo quando ocorre um defeito na rede não é garantida a seletividade e o parque é todo ele retirado de serviço.



A empresa ABB, que participa na evolução deste tipo de tecnologia, já anunciou que desenvolveu, em 2012, um disjuntor capaz de operar em corrente contínua. Mas não divulgou muito acerca da eletrônica de potência utilizada [17]. Até este momento esta é a grande barreira da implementação desta tecnologia de transmissão.

### 2.3.2.1 HVDC Baseados em Tecnologia LCC

Transmissão em corrente contínua não é uma descoberta atual. Em 1954 foi estabelecida a primeira transmissão do tipo HVDC-LCC, entre a ilha da Gotlândia e a Suécia. Esta ligação tem uma capacidade de 20 MW e usa um cabo submarino de 100 kV [3]. A figura 2.19 apresenta o esquema de uma ligação deste tipo.

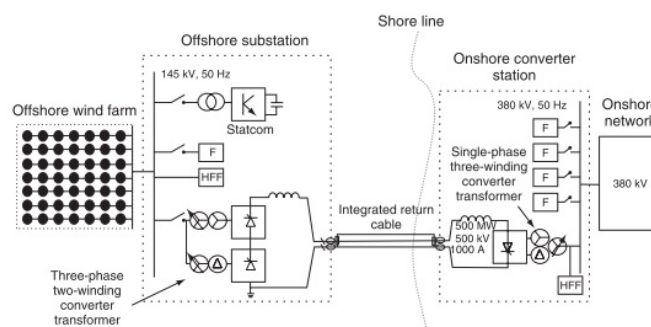


Figura 2.19: Configuração básica de um parque produtor de 500 MW que usa a tecnologia de transmissão HVDC-LCC com um sistema STATCOM. Nota: F = filtro; HFF = Filtro passa alto; O sistema de STATCOM pode ser substituído por um gerador a diesel [3].

Os seguintes componentes fazem parte desta tecnologia de transmissão:

- Filtros AC.
- Filtros DC.
- Transformadores.
- Válvulas de Tiristores.
- Bobines de Alisamento.
- STATCOM ou Banco de Condensadores.
- Cabo de Transmissão DC e de Retorno.
- Serviços Auxiliares de Alimentação.

Os filtros do lado AC são responsáveis por absorver os harmónicos gerados pelo conversor LCC, reduzindo assim o impacto destes na rede. Fornecem ainda energia reativa de auxílio à estação conversora. Os filtros do lado DC encontram-se na rede de transmissão e evitam que os



harmónicos de tensão do lado DC provoquem uma corrente alternada sobreposta à corrente DC na linha de transmissão [18].

Os transformadores permitem trabalhar em diferentes níveis de tensão. As ligações costumam ser estrela-estrela ou estrela-triângulo do lado *onshore* e estrela-estrela ou triângulo-estrela do lado *offshore*. Isto permite uma redução significativa dos harmónicos e com isso são necessários filtros de menor potência. Estes transformadores não são tão simples como os ordinários e necessitam de um isolamento reforçado capaz de suportar a componente alternada da rede e a contínua vinda das válvulas de tirístores.

As válvulas de tirístores são responsáveis pela conversão AC/DC na subestação *offshore* e DC/AC na subestação *onshore* [18].

Os conversores LCC necessitam de uma referência de tensão da rede para operar. Nesse sentido um mecanismo STATCOM é necessário para a definição dessa referência.

As bobinas de alisamento, ligadas em série a cada polo, possuem uma enorme indutância que evita falhas de comutação nos conversores e contribuem para limitar a corrente de curto-circuito [18].

Os serviços auxiliares de alimentação, são normalmente alimentados por um motor a Diesel e fornecem energia às válvulas no início da transmissão, ou em situações de vento muito fraco, assim como a todos os equipamentos de proteção e controlo do sistema [18][3].

Um aspeto importante a ter em conta é a dimensão da estação conversora *offshore* que atinge um tamanho superior à tecnologia HVAC devido à eletrónica de potência utilizada.

### 2.3.2.2 HVDC Baseados em Tecnologia VSC

Transmissão HVDC baseada em tecnologia conversora VSC tem ganho cada vez maior atenção. Esta tecnologia, nomeada pela ABB como HVDC *light* e pela Siemens como HVDC *plus*, vem de grandes avanços na área de eletrónica de potência mais propriamente com o desenvolvimento dos IGBTs que permitem aos sistemas VSC realizar modelação por largura de impulso (PWM), algo que os conversores baseados em tirístores não permitem.

A primeira ligação foi estabelecida em 1999 pela ABB e conecta uma distância de 70 Km entre a ilha da Gotlândia e a Suécia, com uma capacidade de 60 MVA e uma tensão de  $\pm 80$  kV [3].

A figura 2.20 apresenta um exemplo de uma ligação utilizando este tipo de conversores.

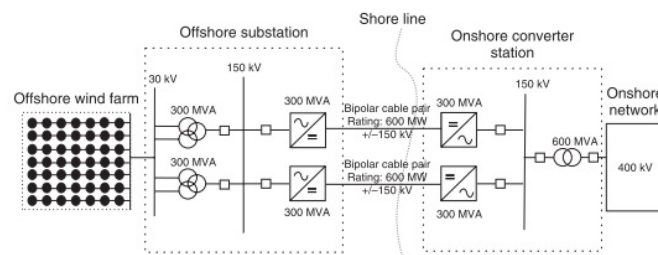


Figura 2.20: Ligação HVDC bipolar de um parque eólico com capacidade de 600 MW, distribuído por duas estações conversoras de 300 MW cada [3].

Desta tecnologia fazem parte os seguintes componentes:

- Filtros AC e DC.
- Transformadores.
- Válvulas IGBTs.
- Condensadores DC.
- Serviço Auxiliar de Alimentação.
- Cabos DC.

As diferenças para a anterior tecnologia é que esta não necessita de um dispositivo STATCOM ou bancos de condensadores na subestação *offshore*. Esta tecnologia possui conversores IGBT em alternativa às válvulas de tirístores que possibilita um controlo independente e rápido da componente ativa e reativa da potência [19].

Tal facto constitui uma enorme vantagem no controlo do despacho numa rede deste MTDC mas há que ter em conta que o valor das perdas associadas aos conversores são superiores à tecnologia HVDC LCC [3].

### 2.3.3 Comparação Entre HVAC, HVDC LCC e HVDC VSC

Do ponto de vista das perdas do sistema de transmissão, a figura 2.21 ajuda-nos a perceber a diferença entre as tecnologias existentes.

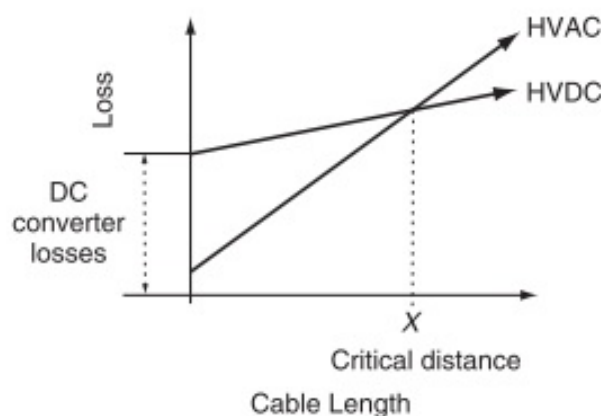


Figura 2.21: Perdas em função da distância para tecnologias HVDC e HVAC [3].

É possível observar que para curtas distâncias, como foi dito na secção 2.3.1, a tecnologia HVAC apresenta um comportamento muito satisfatório em relação às perdas. Não existe um valor pré estabelecido para esta distância crítica, dependendo muito da topologia da rede e da tecnologia

HVDC a utilizar. Dentro da tecnologia HVDC, os conversores VSC apresentam maiores perdas do que os baseados em tecnologia LCC portanto a distância crítica destes será superior [3].

Em longas distâncias, a produção de energia reativa nos cabos na tecnologia HVAC, que provoca desequilíbrios entre as tensões dos terminais, é outro fator penalizador desta tecnologia. Em corrente contínua os problemas de controlo de tensão são ultrapassados.

Outro aspeto importante a ter em conta é a dimensão da subestação. Qualquer que seja a solução HVDC utilizada, esta vai requerer uma subestação de maior dimensão do que a solução HVAC. Tal facto prende-se com a necessidade de conversores e transformadores uma solução contínua, ao passo que na tecnologia HVAC só precisamos dos transformadores e estes podem até nem ser necessários. Dentro das soluções HVDC, a tecnologia LCC ocupa maior espaço do que a tecnologia VSC. Quanto maior for o tamanho da subestação maior será o investimento, principalmente da subestação *offshore* [3].

Os sistemas HVDC baseados em VSC têm a capacidade de controlo de tensão, potência ativa e reativa. Possibilidades que, tanto a tecnologia LCC como HVAC podem ter se forem munidos de equipamento adicional, como STATCOMs ou SVC.

## 2.4 Transmissão *Multi-terminal* em Corrente Contínua MTDC

Na secção 2.3.2 expôs-se a transmissão MTDC como um grande passo na criação de uma rede conectada a vários pontos continentais. A tecnologia HVDC VSC, apresentada na secção 2.3.2.2, é ideal para a construção destas redes devido à sua capacidade de controlar separadamente a componente ativa e reativa da potência, permitindo assim trabalhar nos quatro quadrantes.

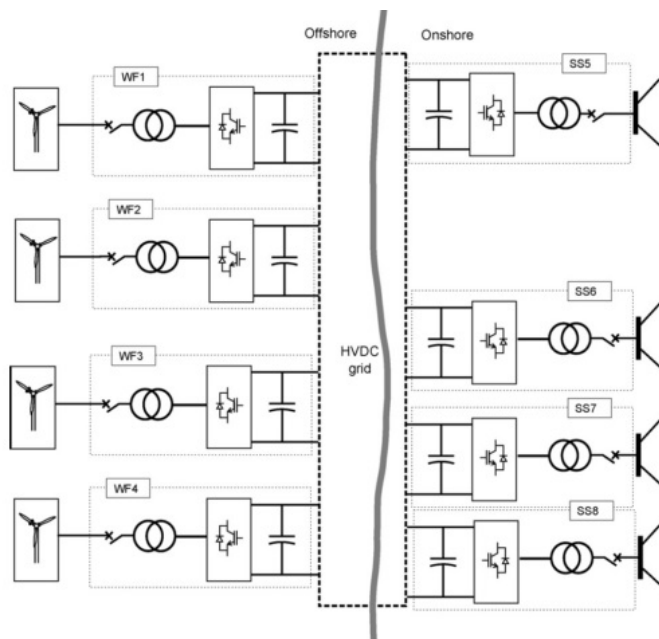


Figura 2.22: Configuração de uma rede de transmissão MTDC com tecnologia conversora HVDC VSC[20].



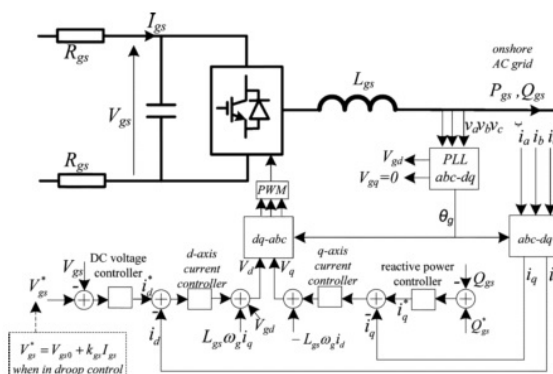


Figura 2.24: Esquema de um conversor VSC do lado *onshore*, em modo de *Droop Control*[21].

Primeiro é calculado o erro entre a tensão de referência e o valor da rede ( $V_{gs}^{ref} - V_{gs}$ ) que passa por um controlador PI, de onde sai um valor de referência para a componente direta da corrente ( $i_d^{ref}$ ). Calcula-se o erro entre esse valor e a componente direta da corrente ( $i_d^{ref} - i_d$ ), que vai passar por outro controlador PI de onde se obtém a tensão direta ( $V_d$ ). Um processo similar, mas em que a variável de entrada é a potência reativa ( $Q_{gs}$ ), é utilizado no cálculo da componente de quadratura ( $V_q$ ). Mais uma vez, o controle PWM é o responsável por entregar estes valores ao conversor [21].

A formulação do controle *Droop* em corrente é em tudo idêntica a esta abordagem apresentada para potência.

Numa transmissão em corrente contínua, uma parte significativa das perdas encontra-se nos conversores dos dois lados da rede.

### 2.4.2 Operação e Controle dos Conversores de uma rede MTDC

Os conversores *offshore*, como já foi dito, controlam a injeção de potência na rede de transmissão MTDC. Existem três modos de operação, normal, limitador de corrente e *Voltage Droop*. A figura 2.25 mostra a característica de tensão-corrente desses modos.

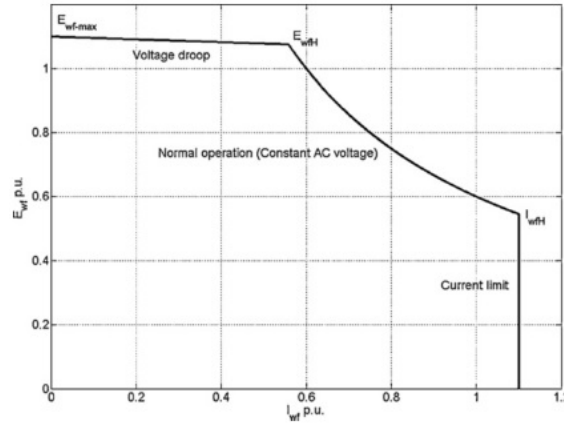


Figura 2.25: Caraterística de tensão e corrente para os três modos de operação de um conversor *offshore* [20].

No modo normal de operação a potência produzida é injetada na rede de transmissão por intermédio dos conversores HVDC-VSC *offshore*. A tensão do parque produtor é mantida constante de forma a absorver o máximo da potência produzida [20].

A equação 2.1 representa a potência que é injetada na rede MTDC pelo parque produtor, num modo de operação normal.

$$P_{wf} = V_{wf} \times I_{wf} \quad (2.1)$$

- $P_{wf}$ - Potência produzida do parque produtor.
- $V_{wf}$ - Tensão do lado DC no parque produtor.
- $I_{wf}$ - Corrente injetada na rede MTDC.

Durante um defeito do lado AC da rede *onshore* ou perda de uma ligação a um conversor, a rede de transmissão MTDC pode não ter capacidade para exportar toda a potência e o nível de tensão vai aumentar. Neste caso os conversores *offshore* iniciam o modo *Voltage Droop* e a corrente DC do parque produtor é controlada através da equação 2.2 [20].

$$I_{wf} = K_{droop} \times (V_{wf}^{max} - V_{wf}) \quad (2.2)$$

- $K_{droop}$ - Constante *droop*, definida para cada conversor.
- $V_{wf}^{max}$ - Valor máximo da tensão definido para cada parque.

O outro modo opera quando o valor máximo da corrente é atingido. O conversor continua a operar mas toma essa corrente como a de referência [20].

Os conversores *onshore* possuem dois modos de operação, funcionamento de um barramento como o de referência e um modo *Voltage Droop Control*.

No primeiro, o objetivo é manter o nível de tensão constante na estação em terra, alterando o valor das correntes conforme as potências que são injetadas na rede. Escolhe-se um conversor como sendo o de referência e os restantes funcionar como os seus subjugados. [21].

Em *Voltage Droop Control* a ideia é, a rede não ficar comprometida com um barramento de referência e evitar a saída de serviço em caso de manutenção ou avaria do mesmo. A função *droop*, calcula o valor da tensão de cada barramento *onshore* em função da corrente que o mesmo injeta na rede. Assim sendo a tensão de cada estação conversora varia em função da corrente numa estratégia de *droop* em corrente, como na equação 2.3 [21].

$$V_{gs} = V_{ref} + K_{droop} \times I_{gs} \quad (2.3)$$

- $V_{gs}$ - Tensão na rede.
- $V_{ref}$ - Valor da tensão de referência.
- $K_{droop}$ - Constante *droop*, definida para cada conversor.
- $I_{gs}$ - Corrente injetada na rede.

Mai uma vez existe outra abordagem possível, utilizada na parte prática deste trabalho e convenientemente explicada na secção 3.3 que é o controlo *Droop* em potência. A estratégia de controlo de tensão segue a mesma equação mas, em vez da corrente injetada na rede,  $I_{gs}$ , temos a potência que é especificada no barramento.

## 2.5 Conclusões

A energia eólica surge como uma alternativa aos combustíveis fósseis. Na Europa existe uma enorme vontade de independência desses recursos esgotáveis e um excelente exemplo disso é a Dinamarca que caminha nesse sentido.

Devido à forte ocupação terrestre é preciso procurar alternativas para a construção de parques produtores e os oceanos surgem como o passo seguinte na exploração de energia eólica.

Nesta alternativa a energia é produzida através de turbinas que constituem os parque eólicos *offshore* e é transmitida para pontos *onshore*, nas plataformas continentais onde a energia é distribuída e consumida.

A profundidade do solo pode ser um fator que influencia esta tecnologia. Por exemplo a costa portuguesa tem uma profundidade superior à da zona do Mar do Norte e devido a esse facto, uma nova forma de produção de energia, através de uma plataforma flutuante, foi elaborada.

Existe a possibilidade de transmitir a energia produzida em corrente alternada (HVAC) ou contínua (HVDC). A primeira segue os princípios de transmissão habitualmente utilizados em terra, apresentando a vantagem de não necessitar de uma estação conversora *offshore* demasiado grande, resultando assim num custo mais reduzido. Ainda assim, a produção de energia reativa

nos cabos de transmissão AC, aumenta com a distância e provoca um desequilíbrio na tensão dos terminais *offshore* e *onshore*.

A transmissão HVDC é feita em corrente contínua, logo não existe problemas com a produção de energia reativa nos cabos. As duas tecnologias dentro da transmissão HVDC dependem do tipo de conversor que utilizam, com comutação natural de linha, baseados em tiristores (HVDC LCC) ou de fonte de tensão, baseados em IGBT (HVDC VSC).

A tecnologia HVDC VSC consegue, através da modulação por largura de impulso (PWM), separar a magnitude e a fase da tensão e controlar de forma independente a componente ativa e reativa da potência. Esta tecnologia adequa-se na perfeição ao conceito de redes Multi-Terminal, que ligam vários parques de produção a vários pontos continentais.

Os conversores *offshore* numa rede MTDC têm um modo de funcionamento normal, controlo *Droop* de potência ou corrente e o modo limitador de corrente em caso de defeito do lado AC da rede. Nos conversores *onshore* temos uma estratégia de controlo em que utilizamos um barramento como referência de tensão ou um modo de controlo *Droop* da tensão nos conversores do lado da rede AC continental.



## Capítulo 3

# Modelização de uma Rede de Transmissão HVDC Multi-Terminal

### 3.1 Introdução

Este capítulo serve para modelizar a rede de transmissão Multi-Terminal utilizada no decorrer da parte prática deste trabalho.

Começa-se por abordar o modelo de uma ligação em corrente contínua e as topologias de rede possíveis, na secção 3.2.

Os conversores *offshore* do modelo da rede a utilizar são sujeitos a duas estratégias de controlo distintas, apresentadas na secção 3.3. O primeiro baseado num barramento que serve como referência de tensão aos restantes e o segundo com o controlo *Droop* da tensão através a potência especificada no barramento.

De forma a resolver o sistema de equações do trânsito de potência nos ramos, e sendo o este não linear, utiliza-se o método *GaussSeidel*, explicado na secção 3.4, para resolução do mesmo.

No final do capítulo, secção 3.4.5, será exposta uma aplicação numérica que exemplifica o trânsito de potências em regime permanente, para cada um dos modos de operação do sistema.

### 3.2 Considerações sobre redes em corrente contínua

#### 3.2.1 Topologias de uma rede MTDC

Existem duas topologias de rede possíveis numa transmissão em corrente contínua, a radial na figura 3.1(a) e a emalhada na figura 3.1(b).

A rede radial estabelece uma ligação ponto a ponto entre um parque produtor e a rede AC continental.

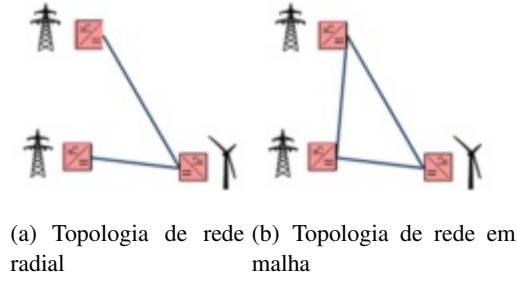


Figura 3.1: Topologias de rede de transporte [22].

Numa topologia radial, uma falha na rede DC provoca uma perda brusca de injeção de potência na rede continental. Esta perda afeta a estabilidade do sistema e no limite implica corte de carga.

Na topologia em malha, onde vários pontos de produção *offshore* estão ligados a vários pontos continentais a estabilidade do sistema é garantida numa situação de falha na rede DC. Assim sendo, do ponto de vista de fiabilidade, uma rede Multi-Terminal apresenta-se como uma solução melhor para o sistema.

### 3.2.2 Modelo da Rede DC

O modelo de uma linha DC é representado pelo equivalente em  $\pi$ , onde a capacidade  $C_{dc}$  é a combinação da capacidade existente na estação conversora (*offshore* ou *onshore*) com a capacidade associada ao próprio modelo em  $\pi$  da linha de transmissão. A capacidade associada à estação conversora, ajuda na estabilização do nível de tensão.

A figura 3.2 mostra o esquema em  $\pi$  de uma ligação bipolar entre duas estações conversoras HVDC-VSC.

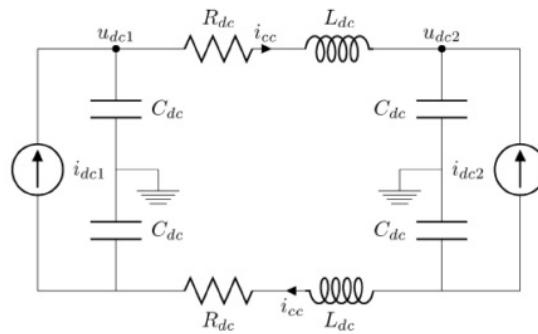


Figura 3.2: Modelo em  $\pi$  de uma linha de transmissão, configuração monopolar[23].

As equações que descrevem este tipo de ligação são as seguintes:

$$C_{dc1} \cdot \frac{du_{dc1}}{dt} = i_{dc1} - i_{cc} \quad (3.1)$$

$$C_{dc2} \cdot \frac{du_{dc2}}{dt} = i_{dc2} + i_{cc} \quad (3.2)$$

$$L_{dc} \cdot \frac{di_{cc}}{dt} = u_{dc1} - u_{dc2} - R_{dc} \cdot i_{cc} \quad (3.3)$$

Onde,

- $u_{dc1}$ - Tensão DC no conversor  $i$ ;
- $i_{dc1}$ - Corrente injetada ou consumida no conversor  $i$ ;
- $i_{cc}$ - Corrente no cabo DC;
- $C_{dc}$ - Capacidade equivalente do conversor  $i$ ;
- $L_{dc}$ - Impedância do cabo DC;
- $R_{dc}$ - Resistência do cabo DC

Numa ligação bipolar, como a representada, os polos de transmissão são o reflexo um do outro ligados a uma terra comum. Sendo assim, é possível simplificar a representação do circuito DC duplicando o valor das capacidades, indutâncias e resistências dos cabos.

A representação passa a ser monopolar e a tensão DC é igual ao dobro da tensão em cada polo. As equações que definem o circuito ficam com a seguinte forma:

$$2 \cdot C_{dc1} \cdot \frac{du_{dc1}}{dt} = i_{dc1} - i_{cc} \quad (3.4)$$

$$2 \cdot C_{dc2} \cdot \frac{du_{dc2}}{dt} = i_{dc2} + i_{cc} \quad (3.5)$$

$$2 \cdot L_{dc} \cdot \frac{di_{cc}}{dt} = u_{dc1} - u_{dc2} - 2 \cdot R_{dc} \cdot i_{cc} \quad (3.6)$$

A nossa análise será feita em regime permanente, onde as capacidades e indutâncias associadas aos cabos em corrente contínua são desprezáveis. Assim sendo a corrente que passa na linha de transmissão vai ser dada pela diferença de tensão entre os dois pontos sobre a resistência dos dois polos do cabo.

$$i_{dc1} = -i_{cc} \quad (3.7)$$

$$i_{dc2} = i_{cc} \quad (3.8)$$

$$u_{dc1} - u_{dc2} = 2 \cdot R_{dc} \cdot i_{cc} \quad (3.9)$$

Logo,

$$i_{cc} = \frac{u_{dc1} - u_{dc2}}{2 \cdot R_{dc}} \quad (3.10)$$

A estas equações devem ser acrescentadas as equações de controlo de tensão DC, apresentadas mais á frente.

### 3.3 Métodos de Controlo de uma Rede MTDC

#### 3.3.1 Barramento de Referência

Este modo de operação da rede consiste em tornar fixo o nível de tensão num barramento, definir as potências injetadas pelos parques *offshore* e a potência estipulada nos restantes barramentos *onshore*.

O barramento onde a tensão é fixada, referência, vai ser responsável por estabelecer o balanço de potência na rede. Vai ficar com tudo o que é produzido em excesso e injetar potência na rede no caso de a produção não ser suficiente para responder a potência estipulada nos restantes pontos continentais.

Neste método o balanço entre as potências é alcançado por apenas um conversor *onshore*, assim sendo a sua ligação à rede deve ser suficientemente forte de forma a suportar todas as variações de fluxo do sistema de transmissão. Em caso de falha do barramento de referência o sistema pode entrar em colapso.

#### 3.3.2 Controlo *Droop* da Tensão

O método de controlo do nível de tensão por *droop* baseia-se no mecanismo de regulação primária de frequência na dinâmica de sistemas. Em sistemas de corrente alternada, de forma a manter o balanço entre a produção e a procura, certas unidades produtoras são equipadas com controladores que regulam a sua potência de acordo com uma frequência estipulada que se deve manter no sistema. Esta característica potência-frequência é chamada de *Droop Control* [22].

$$V_i = V^{ref} + k_i \times P_i \quad (3.11)$$

- $V_i$ - Tensão *Droop* no barramento  $i$
- $V_{ref}$ - Valor de referência da tensão
- $k_i$ - Constante de *Droop*
- $P_i$ - Potência requirida no barramento  $i$ .

Os parâmetros desta equação encontram-se todos em valor *p.u.* A constante  $k$  é dada pela relação entre um desvio máximo de tensão ( $\Delta V$ ) permitido e a potência nominal da máquina ( $P_n$ ).

$$k = \frac{\Delta V}{P_n} \quad (3.12)$$

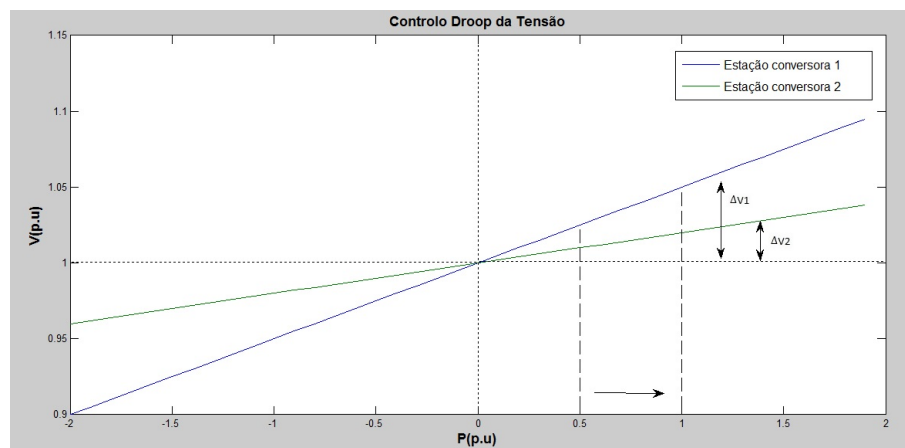


Figura 3.3: Controlo *Droop* da tensão em função da potência na estação conversora, para duas estações com diferentes potências nominais.

Graficamente a tensão varia conforme uma equação da reta, cujo declive depende da constante  $k$  calculada. A figura 3.3 representa a equação de controlo de duas estações conversores com potências nominais diferentes. A estação 1 apresenta uma potência nominal inferior à estação 2.

A estação com maior potência nominal funciona a um nível de tensão inferior ao da estação mais pequena. Quando existe uma variação de potência, o conversor 2 sofre uma variação do nível de tensão que é inferior em relação ao conversor 1.

Quanto maior o valor nominal da potência de uma estação mais pequeno será o valor do declive ( $k$ ) da reta e menor será a variação de tensão que a estação sofre para operar em níveis de potência diferentes.

O controlo *Droop* só pode estar nos barramentos com ligação à rede continental, nunca nos barramentos associados a parques *offshore*.

A sua aplicação em redes de corrente contínua é vantajosa, principalmente com o aumento do número de terminais ligados à rede. Esta solução aumenta a fiabilidade do sistema diminuindo a rigidez do mesmo.

### 3.4 Trânsito de Potências numa Rede Multi-Terminal

#### 3.4.1 Rede de Transmissão MTDC

A figura 3.4 representa a rede MTDC que foi utilizada para simular o problema de trânsito de potências. A mesma rede vai ser uma das redes de teste utilizadas na etapa de otimização e os seus parâmetros encontram-se no anexo A.

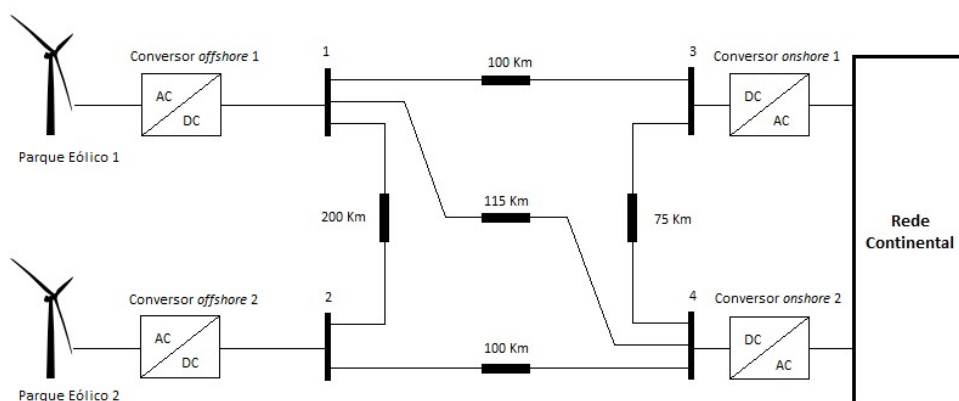


Figura 3.4: Esquema da rede de transmissão DC utilizada neste trabalho.

Esta rede é constituída por dois parques eólicos de produção *offshore* que injetam potência na rede ( $P_1$  e  $P_2$ ) e duas estações *onshore* ( $P_3$  e  $P_4$ ). A ligação entre os pontos é bipolar e feita através de cabo submarino HVDC XLPE.

Na estratégia de barramento de referência, o barramento 3 vai servir como referência de tensão para os restantes barramentos. Neste caso a tensão no barramento 3 ( $V_3$ ) vai ser a variável de controlo do sistema e as restantes tensões e a potência no barramento 3 ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_4$  e  $P_3$ ), serão os dados de saída do problema.

Quando a estratégia é controlo da tensão por *Droop* a tensão no barramento 4 vai ser conhecida através da equação 3.11. Neste caso o barramento 3 vai servir como um barramento de compensação do sistema e vai variar de acordo com a mesma equação. Assim a tensão nos dois barramentos *onshore* da rede, passam a ser controlados por *Droop Control*. A variável de controlo passa a ser a tensão de referência no barramento 4 ( $V_{ref4}$ ), e as incógnitas do sistema passam a ser as tensões nos restantes barramentos e a potência no barramento 3 ( $V_1, V_2, V_3$  e  $P_3$ ).

Na tabela 3.1, encontra-se organizada a informação referente a variáveis de entrada e de saída do problema de trânsito de potências para as duas estratégias de controlo em análise.

Tabela 3.1: Variáveis de entrada (VE) e de saída (VS) do problema de trânsito de potências.

Barramento de Referência		Controlo <i>Droop</i> da tensão	
VE	VS	VE	VS
$P_1$	$V_1$	$P_1$	$V_1$
$P_2$	$V_2$	$P_2$	$V_2$
$P_4$	$V_4$	$P_4$	$V_3$
$V_3$	$P_3$	$V_{ref4}$	$P_3$

### 3.4.2 Construção da Matriz das Admitâncias Nodais

Como já foi explicado anteriormente, numa rede DC, em análise de regime permanente, apenas são considerados os elementos resistivos da linha. Assim sendo as perdas nas linhas estão associadas a uma resistência ( $R_{ij}$ ), entre dois nós adjacentes. A corrente em cada nó é obtida através da 1ª Lei de *Kirchhoff*, da seguinte forma:

$$I_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I_{ij} \quad (3.13)$$

- $I_i$ - Corrente injetada no barramento  $i$
- $I_{ij}$ - Corrente entre o barramento  $i$  e o barramento  $j$ , ramo  $ij$
- $n$ - Número de barramentos.

A equação anterior pode ser escrita utilizando as resistências da rede DC e a tensão nos barramentos:

$$I_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{R_{ij}} \times (V_i - V_j) \quad (3.14)$$

- $R_{ij}$ - Corresponde à resistência do ramo  $ij$
- $V_i, V_j$ - Tensões nos barramentos  $i$  e  $j$ .

De forma a generalizar, representamos a equação 3.14 em forma de matriz. Assim a nossa rede DC apresenta-se na forma matricial.

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} \quad (3.15)$$

- **I**- Vetor das correntes injetadas de todos os barramentos da rede
- **Y**- Matriz das Admitâncias nodais
- **V**- Vetor das tensões nodais.

$$\begin{cases} Y_{ij} = -\frac{1}{R_{ij}} & \forall i \neq j \\ Y_{ii} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_{ik}} \end{cases} \quad (3.16)$$

Se não existir ligação entre dois barramentos da rede, a resistência entre eles é infinita e o valor da admitância é nulo. A matriz de admitâncias nodais é simétrica, logo o valor da admitância do ramo  $Y_{ij}$  é igual á admitância  $Y_{ji}$ .

Os elementos da diagonal principal  $Y_{ii}$  correspondem à soma de todas as admitâncias nodais dessa linha. O sistema matricial de equações terá o seguinte aspeto:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & \ddots & Y_{2n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

O sistema de equações 3.17 é linear e resolve-se facilmente utilizando uma técnica de substituição ou a regra de *Cramer*. No entanto como se sabe o valor de algumas potências em alguns nós e de tensões noutros, como foi exposto na tabela 3.1, o sistema de equações passa a ser não linear e necessitamos de um método iterativo para o resolver.

### 3.4.3 Método de Gauss Seidel

Na resolução do sistema de equações não lineares do trânsito de potências da rede irá ser utilizado o método de *Gauss Seidel*, sendo o seu funcionamento descrito nesta secção.

O método de *Gauss Seidel* aplicado a uma rede de transmissão DC, em regime permanente, é ligeiramente diferente pois o trânsito de reativa não será considerado.

Considerando o sistema com  $n + 1$  barramentos, em que um é o barramento de referência, as equações matriciais podem ser descritas como:

$$\begin{aligned} Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2 + \cdots + Y_{1n} \cdot V_n &= I_1 = \frac{S_1}{V_1} \\ Y_{21} \cdot V_1 + Y_{22} \cdot V_2 + \cdots + Y_{2n} \cdot V_n &= I_2 = \frac{S_2}{V_2} \\ &\vdots \\ Y_{n1} \cdot V_1 + Y_{n2} \cdot V_2 + \cdots + Y_{nn} \cdot V_n &= I_n = \frac{S_n}{V_n} \end{aligned} \quad (3.18)$$



A natureza física de problema de trânsito de potências permite que os elementos da diagonal principal sejam todos não nulos, e sendo assim podemos escrever as equações da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_1^{novo} &= \frac{1}{Y_{11}} \cdot \left( \frac{S_1^{antigo}}{V_1^{antigo}} - Y_{12} \cdot V_2^{antigo} - \dots - Y_{1n} \cdot V_n^{antigo} \right) \\ V_2^{novo} &= \frac{1}{Y_{22}} \cdot \left( \frac{S_2^{antigo}}{V_2^{antigo}} - Y_{21} \cdot V_1^{antigo} - \dots - Y_{2n} \cdot V_n^{antigo} \right) \\ &\vdots \\ V_n^{novo} &= \frac{1}{Y_{nn}} \cdot \left( \frac{S_n^{antigo}}{V_n^{antigo}} - Y_{n1} \cdot V_1^{antigo} - \dots - Y_{nn} \cdot V_n^{antigo} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Resumindo o cálculo da tensão para um barramento geral  $i$ , sobre forma de somatório fica:

$$V_i^{novo} = \frac{1}{Y_{ii}} \cdot \left( \frac{S_i^{antigo}}{V_i^{antigo}} - \sum_{k \neq i} Y_{ik} \cdot V_k \right) \quad (3.20)$$

O valor das tensões devem ser atualizados com o decorrer das iterações do método. A convergência deste método é verificada através da diferença entre duas variáveis obtidas em iterações consecutivas [24].

Este método é facilmente programável e exige pouca memória computacional, daí o seu interesse para a realização deste trabalho.

#### 3.4.4 Problema de Trânsito de Potências em Controlo *Droop* de Tensão

Na estratégia de controlo *droop* de tensão o problema de resolução do trânsito de potências torna-se um pouco mais complicado porque a estas equações do método iterativo adiciona-se a equação 3.11 a cada um dos barramentos *onshore*. Para dois barramentos adjacentes este método pode devolver valores de trânsito de potências fisicamente impossíveis, logo é preciso regular os valores de referência em cada equação de forma encontrar uma solução viável.

Utilizando a *rede 1* de teste como exemplo de resolução do problema de controlo *droop* nos dois barramentos *onshore*, obtém-se a seguinte matriz de admitâncias nodais:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Como o valor da potência especificada no ponto 4 é conhecido e consequentemente o valor da tensão através da equação 3.11, o barramento 4 é do tipo PV e pode ser considerado como o barramento de referência. Como o problema em regime permanente se refere a um trânsito em DC, não são necessários os valores dos ângulos associados a cada barramento.

De forma a tornar a matriz não singular eliminam-se uma linha e uma coluna na matriz de admitâncias, referentes ao barramento de referência. A matriz de admitâncias passa a ser invertível e

o sistema de equações não lineares pode ser resolvido. As tensões nos restantes barramentos deixam de ser medidas em relação à terra e passam a ser medidas em relação à tensão no barramento 4.

$$V_{i,terra}^{i \neq 4} = V_{i,4} + V_4 \quad (3.22)$$

onde,

- $V_{i,terra}$  - Tensão de cada barramento medida em relação à terra
- $V_{i,4}$  - Tensão de cada barramento medida em relação ao barramento de referência
- $V_4$  - Tensão no barramento de referência.

Desta forma o sistema de equações não lineares toma a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{P_1}{V_4 + V_{14}} \\ \frac{P_2}{V_4 + V_{24}} \\ \frac{-P_3}{V_3^{ref} + k_3 \cdot P_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{14} \\ V_{24} \\ V_{34} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Onde acrescentando a equação 3.11 ao barramento 3 obtém-se,

$$V_{34} = V_3^{ref} + k_3 \cdot P_3 - V_4 \quad (3.24)$$

Utilizando o método de *Gauss Seidel* é possível obter os valores de  $V_{14}$ ,  $V_{24}$  e  $P_3$  e substituindo nas equações 3.22 e 3.11 obtém-se os valores de  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ . Mais uma vez estes valores podem não representar soluções possíveis, pelo que o valor  $V^{ref}$  associado a cada uma das equações dos barramentos *onshore* necessita de ser regulado.

### 3.4.5 Aplicação Numérica em Regime Permanente

Neste capítulo será utilizada a rede da figura 3.4 e simulado o trânsito de potências através da metodologia descrita até aqui.

Foram realizadas simulações para as duas estratégias de controlo descritas na secção 3.3. Na primeira simulação especificamos o nível de tensão no barramento 3 em  $1.1p.u$  e consideramos que os dois parques eólicos estavam a produzir  $1$  e  $2p.u$  respetivamente. Especificou-se a potência de  $1.5p.u$  no barramento 4.

A tabela 3.2 representa os níveis de tensão a que os barramentos se encontram e a tabela 3.3 contém a solução de trânsito de potência encontrada. De referir que o sinal positivo significa que a corrente sai do barramento e o sinal negativo que essa corrente é injetada.

Tabela 3.2: Tensões nodais para a simulação de controlo por barramento de referência.

Tensões nos Barramentos				
	1	2	3	4
V(p.u.)	1.1082	1.1159	1.1000	1.1032

Tabela 3.3: Trânsito de potências na simulação de controlo por barramento de referência.

Trânsito de Potências				
P(p.u.)	1	2	3	4
1	1.0000	-0.4613	0.9796	0.4817
2	0.4646	2.0000	0	1.5354
3	-0.9724	0	-1.4720	-0.4996
4	-0.4795	-1.5179	0.5011	-1.5000

Na tabela 3.2 é possível observar que os níveis de tensão não variam muito do valor estipulado no barramento 3. Este barramento vai ser o responsável por ficar com o excedente de produção dos parques eólicos de forma a manter a potência no barramento 4 dentro do valor especificado de  $1.5p.u.$  As perdas para esta situação são de  $0.03p.u.$

Na segunda simulação controlou-se por *Droop* as tensões nos barramentos 3 e 4. Fixou-se na mesma a potência especificada no barramento 4 em  $1.5p.u.$  e utilizou-se a equação 3.11 para definir o nível da tensão no barramento. A tensão nos restantes barramentos foram obtidas através da resolução do trânsito de potências e a tensão no barramento 3 varia de acordo com a mesma equação do barramento 4. O valor de  $k$  é constante e fixou-se em 0.2 para esta simulação.

Foram realizados dois testes para analisar o comportamento do barramento 3. No primeiro os dois parques eólicos estão a produzir  $2p.u.$  cada, capacidade que garante a potência especificada no barramento 4. No segundo cenário os dois parques eólicos estão a produzir  $0.5p.u.$  cada o que não é suficiente para garantir o valor especificado da potência em 4. Os valores nominais de potência nos conversores *onshore* são de 5 e  $4.4p.u.$ , respetivamente.

Através das tabelas 3.4 e 3.5 podemos retirar os níveis de tensão nos barramentos e o resultado do trânsito de potências.

Tabela 3.4: Tensões nos barramentos em controlo *droop* de tensão.

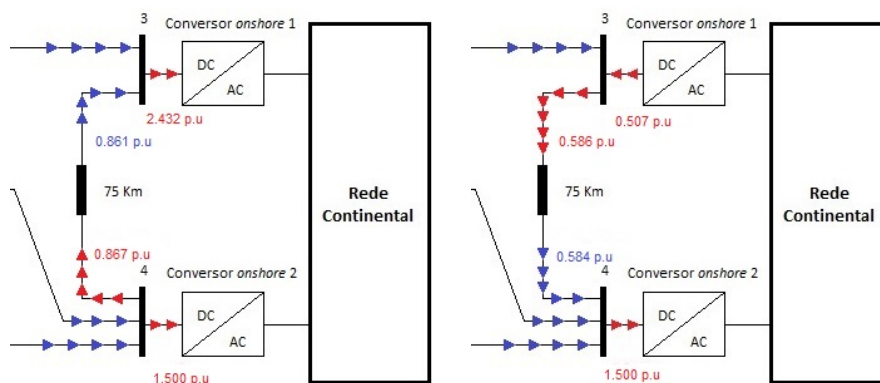
Tensões nos Barramentos				
	1	2	3	4
V(p.u.)	0.957	0.963	0.941	0.947

Tabela 3.5: Trânsito de potências em controlo *droop* de tensão.

P(p.u.)	Trânsito de Potências			
	1	2	3	4
1	2.000	-0.346	1.596	0.752
2	0.351	2.000	0	1.649
3	-1.571	0	-2.432	-0.861
4	-0.745	-1.622	0.867	-1.500

Os valores de referência das tensões *onshore* são de  $0.455p.u$  no barramento 3 e de  $0.647p.u$  no barramento 4. Estes valores entram na equação de controlo *droop* dos barramentos, definindo os níveis de tensão em cada. As perdas nesta situação foram de  $0.068p.u$ .

Numa situação em que os parques eólicos estejam a  $0.5p.u$  cada para garantir os  $1.5p.u$  no barramento 4, o barramento 3 vai servir como compensação de forma a garantir o equilíbrio entre as potências da rede. Através das figuras 3.5(a) e 3.5(b) é possível comparar o comportamento do barramento 3, que servirá como barramento de compensação, durante as duas situações de produção nos parques eólicos.



(a) Parques eólicos a produzir  $2p.u$  cada. res- (b) Parques eólicos a produzir  $0.5p.u$  cada. 4.  
petivamente.

Figura 3.5: Resultados dos dois testes realizados para a estratégia de controlo *Droop* da tensão.

Visto que a potência especificada no ponto 4 não está a ser garantida o barramento 3 vai equilibrar o balanço entre as potências e vai passar a injetar potência na rede, invertendo-se assim o sentido do trânsito de potência do ramo 34.

### 3.4.6 Conclusão

Um problema de trânsito de potências numa rede DC, em regime permanente, tem uma configuração diferente do trânsito numa rede AC. Os elementos indutivos e capacitivos das linhas são desprezáveis e isso faz com que a Matriz das Admitâncias nodais seja apenas constituída por elementos resistivos. Assim sendo o trânsito de potências é calculado através de diferenças de tensões nos barramentos.

Como se sabe os valores das tensões em certos nós e as potências injetadas noutros, o sistema de equações resultante é não linear, logo um método iterativo terá de ser utilizado na sua resolução.

Foi utilizado o método de *Gauss Seidel*, que apresenta uma convergência rápida na rede de teste usada. Foi simulado o trânsito de potências para as duas estratégias de controlo existentes.

Numa estratégia de controlo por barramento de referência, a variável de controlo é a tensão num dos barramentos *onshore*. A tensão neste barramento vai servir de referência para as tensões dos restantes que acompanham o seu desenvolvimento.

A estratégia de controlo *Droop* da tensão, em regime permanente, apresenta uma configuração mais complicada por serem adicionadas as equações de controlo *droop* ao método iterativo. Como o valor das perdas não é conhecido temos de procurar pontos de funcionamento que não sejam fisicamente impossíveis. A variável de controlo nesta situação será o valor de referência estipulado na equação de tensão *Droop* do barramento *onshore* escolhido.

Concluiu-se a importância de existir um barramento que sirva de compensação e seja responsável por equilibrar o balanço de potências na rede. Quanto ao valor das perdas na rede, está associado ao nível de tensão a que a rede opera. Com o aumento do nível de tensão, diminui o valor da corrente e as perdas.



## Capítulo 4

# Formulação de Estratégias de Otimização numa Rede MTDC

### 4.1 Introdução

Com o intuito de otimizar as condições de operação de uma rede MTDC, utilizou-se o algoritmo EPSO.

Na secção 4.2.1 será apresentado o modelo básico do algoritmo de forma a compreender melhor os mecanismos de otimização evolucionários.

Um algoritmo otimizador segue sempre um determinado objetivo. Na nossa rede esse objetivo é a minimização das perdas de transmissão e a respetiva função é formulada na secção 4.2.2.

Por fim nas secções 4.3 e 4.4 são explicadas as diferenças na adaptação do algoritmo para as duas estratégias de controlo existentes.

### 4.2 Algoritmo Evolucionário de Otimização (EPSO)

O Algoritmo de Otimização por Enxames Evolucionários de Partículas, EPSO (*Evolutionary Particle Swarm Optimization*), vai ser utilizado neste trabalho com o intuito de identificar os melhores parâmetros de controlo relativos às estratégias de operação de redes HVDC multi-terminal já referenciadas, e tendo por objetivo a redução de perdas.

Este algoritmo segue-se pelo princípio de seleção natural existente entre os seres vivos. Indivíduos mais fortes e melhor preparados dominam os mais fracos e sobrevivem. Isto acontece porque têm alguma característica que os distingue dos restantes elementos da sua espécie. Esta característica passa para os seus descendentes por herança, o que os vai permitir vencer os restantes indivíduos da população.

Assim o método EPSO permite evoluir os indivíduos de uma população, e os seus parâmetros estratégicos, até uma solução ótima. Esse deslocamento é obtido através de equações de movimento, associadas a cada indivíduo [25].

O algoritmo EPSO é um processo de aprendizagem do melhor modo de progressão para o ótimo [25].

#### 4.2.1 Modelo Básico

Para uma dada iteração  $k$ , um indivíduo, ou partícula, é constituído por um conjunto de parâmetros objeto e parâmetros estratégicos  $[X, w]$ . Se o parâmetro objeto é a partícula, ou conjunto delas, os parâmetros estratégicos são os pesos da inércia, memória, cooperação e desvio ótimo. Estas partículas irão evoluir ao longo de um dado número de gerações, segundo as seguintes etapas:

- Replicação
- Mutação
- Reprodução
- Avaliação
- Seleção

Na replicação, cada partícula  $i$  é clonada  $n - 1$  vezes resultando em  $n$  partículas no espaço de pesquisa. Após a primeira etapa, cada partícula sofre mutação dos seus parâmetros estratégicos ( $w$ ), através da seguinte equação:

$$w_{i,j}^{novo} = w_{i,j} + \tau \cdot N(0, 1) \quad (4.1)$$

O valor do índice  $j$  ( $1, \dots, 4$ ) é referente a cada um dos quatro parâmetros estratégicos existentes. O parâmetro  $\tau$ , fixado externamente, é o coeficiente de aprendizagem responsável por controlar a amplitude das mutações. A função  $N(0, 1)$  é um número aleatório com distribuição Gaussiana de média 0 e variância 1. Na inicialização do algoritmo, estes pesos tomam um valor aleatório entre 0 e 1.

Na etapa de reprodução, são utilizadas equações de movimento de forma a que cada partícula gere os seus descendentes. As novas partículas vão ser obtidas por:

$$X_i^{novo} = X_i + V_i^{novo} \quad (4.2)$$

onde  $V_i$  é obtido da seguinte forma:

$$V_i^{novo} = w_{i,iner} \cdot V_i + w_{i,mem} \cdot (b_i - X_i) + w_{i,coop} \cdot (b_G^{novo} - X_i) \quad (4.3)$$

Existe um vetor  $b_i$  que guarda a melhor posição de cada partícula e outro que guarda a melhor posição encontrada até ao momento pelo enxame,  $b_G$ . A este último é aplicada uma mutação de forma a permitir que o enxame continue a ser agitado, mesmo quando as partículas já convergiram



todas para a mesma região do espaço ou estão muito próximas. Assim o vetor  $b_G^{ovo}$  é calculado da seguinte forma:

$$b_G^{ovo} = b_G + w_{i,desv.otimo}^n \cdot ovo \cdot N(0, 1) \quad (4.4)$$

Na avaliação cada descendente tem a sua adaptação avaliada, de acordo com a posição que ocupa no espaço. Por fim, na etapa de seleção por torneio estocástico, os  $n$  descendentes de cada partícula competem entre si e o melhor indivíduo é selecionado para formar a nova geração. A figura 4.1, ilustra o processo de reprodução de uma partícula EPSO.

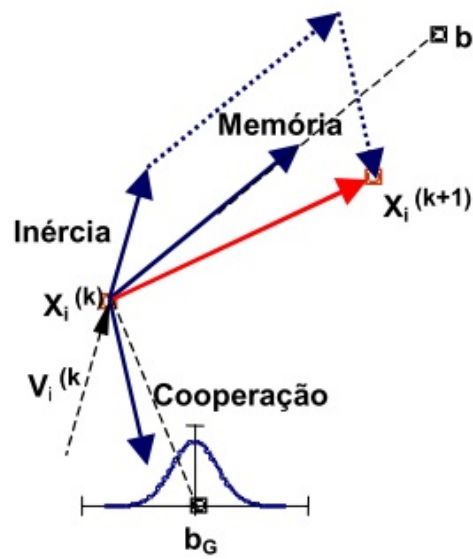


Figura 4.1: Ilustração da reprodução de uma partícula no EPSO. Uma partícula  $i$  localizada em  $X$ , numa iteração  $(k)$ , origina um descendente na iteração  $(k + 1)$ , sob a influência dos três termos de inércia, memória e cooperação. Relativamente a este último termo, a atracção efetua-se para uma vizinhança definida por uma distribuição Gaussiana do ótimo corrente  $b_G$ . [25].

Portanto dado um enxame de partículas, cada uma gera  $n$  descendentes dos quais apenas um sobrevive. O processo mantém-se em paralelo para todas as partículas mas existe um acoplamento entre elas por via do termo de cooperação, que condiciona a criação de novas partículas.

#### 4.2.2 Definição da Função Objetivo

O processo de otimização vai conter apenas uma variável de decisão na estratégia de controlo por barramento de referência, referente à tensão de referência no barramento 3. Na estratégia de controlo *droop* de tensão existem duas variáveis de decisão referentes ao valor de referência da equação de controlo *droop* para cada conversor do lado *onshore*. A população é constituída por 12 partículas, cada uma com a dimensão das variáveis de decisão do problema.

O objetivo do algoritmo vai ser a minimização do valor das perdas de uma rede de transmissão, onde a potência injetada em cada barramento,  $P_i$ , é obtida através do trânsito de potências do

sistema. As perdas vão ser obtidas somando as potências injetadas de todos os barramentos, tendo em conta que o sinal da potência em cada barramento depende se esse está a injetar ou a absorver potência da rede.

$$\min P_{perdas} = \min \sum_{i=1}^n P_i \quad (4.5)$$

Falta ter em consideração nesta função, a limitação de tensão imposta a cada barramento e uma parcela que penalize a função se o limite de potência for ultrapassado em alguma linha. Neste trabalho limitou-se a tensão nos barramentos, entre um valor mínimo de  $0.9p.u$  e um máximo de  $1.1p.u$ . O limite das linhas, tem a ver com as características do cabo utilizado, vai ser de  $4.2p.u$ .

Assim sendo a função *fitness* para o problema pode-se escrever da seguinte forma:

$$Fitness = \min \left( \sum_{i=1}^n (P_i + \alpha \cdot \Delta V_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^k \Delta P_{i,j} \right) \quad (4.6)$$

onde,

$$\Delta V_i = \begin{cases} (V^{max} - V_i)^2 & \text{se } V_i > V_{max} \\ (V^{min} - V_i)^2 & \text{se } V_i < V_{min} \end{cases} \quad (4.7)$$

e,

$$\Delta P_{i,j} = |P_{i,j}| - \lambda \quad \text{se } P_{i,j} > \lambda \quad (4.8)$$

- $P_i$  – Potência no barramento  $i$
- $\alpha$  – Valor muito grande que representa a penalização
- $\Delta V$  – Desvio de tensão do valor máximo ou mínimo
- $V_{max}, V_{min}$  – Limites, máximo e mínimo, da tensão em cada barramento
- $\Delta P_{i,j}$  – Potência acima da capacidade da linha
- $\lambda$  - Limite da linha
- $n$  – Número de barramentos
- $k$  – Número de linhas de transmissão.

As restrições de potência nos barramentos são respeitadas pelo problema de trânsito de potências. Esta função objetivo genérica, vai ser utilizada em todos os cenários e para as duas redes de teste deste trabalho.

### 4.2.3 Exemplo de Teste para uma Simulação

De forma a perceber o comportamento da partícula e da função *fitness*, nesta secção expõe-se um exemplo de teste.

Na simulação utilizou-se a rede de teste da figura 3.4, com todos os parâmetros do problema iguais aos da secção 3.4.5 para a estratégia de controlo por barramento de referência. A partícula do EPSO será a tensão no barramento de referência ( $V_3$ ).

Através do gráfico da figura 4.2, é possível observar o comportamento da função *fitness* até encontrar o ponto ótimo.

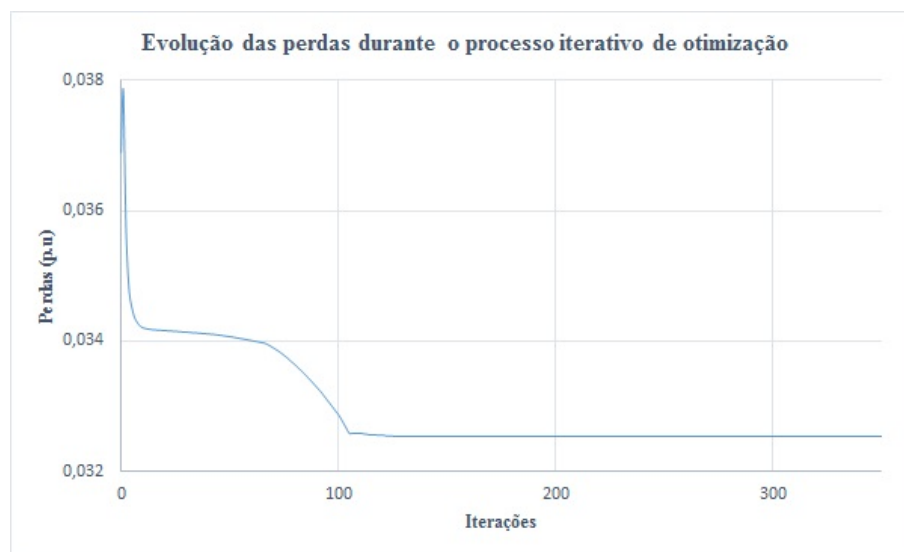


Figura 4.2: Evolução da função *Fitness* de minimização das perdas do sistema ao longo de 350 iterações.

O processo foi corrido ao longo de 1000 iterações, mas apenas se apresentam as primeiras 350 devido à convergência rápida do algoritmo para este caso. A partícula percorreu zonas longe do ótimo nas primeiras 100 iterações, encontrado pouco depois a solução que se viria a estabilizar como ótima.

O gráfico da figura 4.3 mostra a evolução da partícula ( $V_3$ ) assim como das restantes tensões ( $V_1, V_2, V_4$ ).

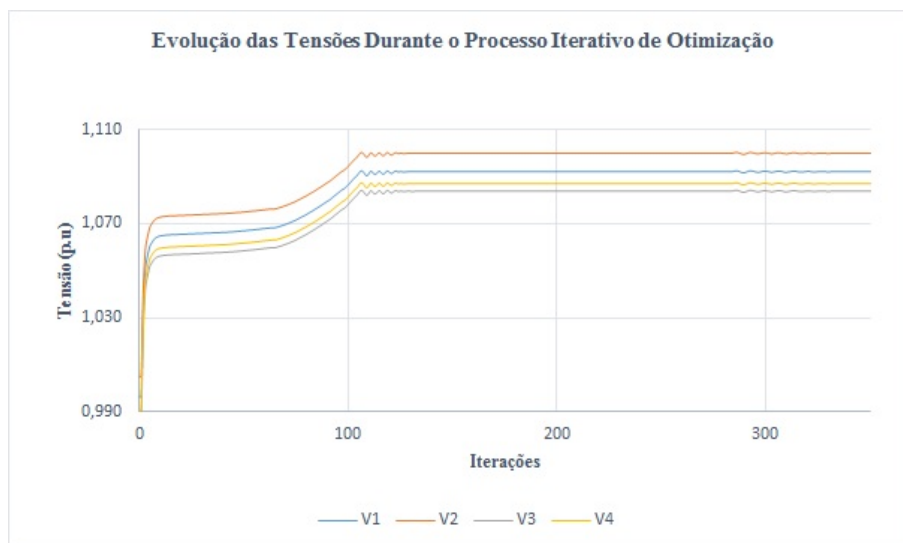


Figura 4.3: Evolução do valor da partícula referente à tensão no barramento 3 e das tensões nos restantes barramentos do sistema de transmissão (1, 2 e 4)

A evolução na procura de um resultado que minimize as perdas está diretamente ligada com o aumento dos níveis de tensão no sistema. É importante salientar que o nível de tensão no barramento 2 é sempre superior aos restantes porque este barramento envia potência a todos os outros. Por razão contrária, os barramentos 3 e 4 apresentam os níveis de tensão mais baixos.

### 4.3 Modelo de Otimização em Controlo por Barramento de Referência

No trânsito de potências de uma estratégia de controlo por barramento de referência, a variável de controlo vai ser a tensão nesse barramento. Assim sendo, essa tensão será a variável de decisão que vai entrar no processo EPSO e vai gerar descendentes até encontrar uma solução ótima. Esta tensão vai variar entre o intervalo de 0.9 a 1.1 p.u., que representa todos os indivíduos da população.

A tensão nos restantes barramentos vai ser conhecida através da função do trânsito de potências, que é anexa ao algoritmo de otimização. Estas tensões terão de respeitar os limites impostos, assim como o trânsito de potência nas linhas.

### 4.4 Modelo de Otimização em Controlo *Droop* da Tensão

No caso de uma estratégia de controlo *Droop* de tensão, as variáveis de decisão vão ser o valor das tensões de referência nos barramentos controlados por *Droop*. Estes valores variam entre 0.4 a 1.1 p.u., intervalo que representa todo o espaço de soluções possíveis.

As tensões nos barramentos controlados por *Droop* serão calculadas através da equação 3.11 e as restantes tensões através da função de trânsito de potências. Esta função encontra-se anexada ao algoritmo EPSO de otimização.

Da mesma forma, todas as tensões nos barramentos deverão respeitar os limites impostos e o trânsito de potência nas linhas deverá estar dentro das limitações nas mesmas.

De forma a minimizar o impacto de eventuais desvio de potência face ao valor especificado num barramento controlado por *droop*, foi adicionada uma parcela à função objetivo que garante a potência especificada no barramento 4.

$$\Delta P_4 = P_4^{esp} - P_4^{calc} \quad (4.9)$$

O desvio da potência no barramento 4, calcula a diferença entre o valor especificado e o valor calculado pelo trânsito de potências. Esta parcela vai penalizar soluções que não respeitam o valor estipulado no ponto 4 da rede.

## 4.5 Conclusão

O EPSO é um algoritmo evolucionário que permite evoluir um conjunto de partículas, através de uma função *fitness*, até uma solução ótima. Tem este mérito graças a equações de movimento que através dos parâmetros de inércia, memória e cooperação guiam uma partícula, no espaço de soluções possíveis, até o espaço de soluções ótimas.

Neste trabalho a função *fitness* vai procurar minimizar as perdas do sistema, penalizando as situações em que a tensão se encontra fora de um certo intervalo ou os limites das linhas são violados. Em controlo *droop* de tensão é adicionada uma parcela que penaliza as situações em que a potência especificada no barramento 4 não é respeitada.

Para a estratégia de controlo por barramento de referência, a partícula vai ser a tensão no barramento 3. Já para uma estratégia de controlo *droop* de tensão as partículas são os valores de referência da equação de controlo nos dois barramentos *onshore*.



## Capítulo 5

# Solução e Resultados das Simulações

### 5.1 Introdução

Este capítulo diz respeito à etapa de simulação e obtenção de resultados. Na secção 5.2 serão apresentados os casos de estudo, mais propriamente as redes de teste utilizadas e os diagramas de produção dos parques eólicos e potência especificada no conversor 4 do lado *onshore*.

Na secção 5.3 são apresentados resultados obtidos para uma simulação com potência especificada constante para a estratégia de controlo por barramento de referência, de forma a que seja possível perceber a evolução do processo de otimização assim como os resultados esperados para as simulações seguintes, em que a potência especificada no barramento 4 é variável, secção 5.4. Nesta secção serão apresentados os resultados para as duas estratégias de controlo. Serão ainda analisadas as diferenças entre as redes de teste utilizadas e a influência que os seus parâmetros têm nos resultados obtidos.

Por fim, na secção 5.4.3, será feita a comparação entre os resultados obtidos para as duas estratégias de controlo simuladas.

### 5.2 Casos de Estudo

#### 5.2.1 Redes de teste

Durante a fase experimental do trabalho, foram utilizadas duas redes de teste diferentes, ambas com uma topologia Multi-Terminal.

A primeira, *rede 1*, foi representada na figura 3.4, secção 3.4.1. Trata-se de uma rede que liga dois pontos de produção *offshore* a dois pontos da rede continental. A segunda rede de teste, *rede 2*, contém mais um parque produtor do que a anterior, o que resulta numa maior capacidade injetada na rede. A figura 5.1 representa o seu esquema ilustrativo.

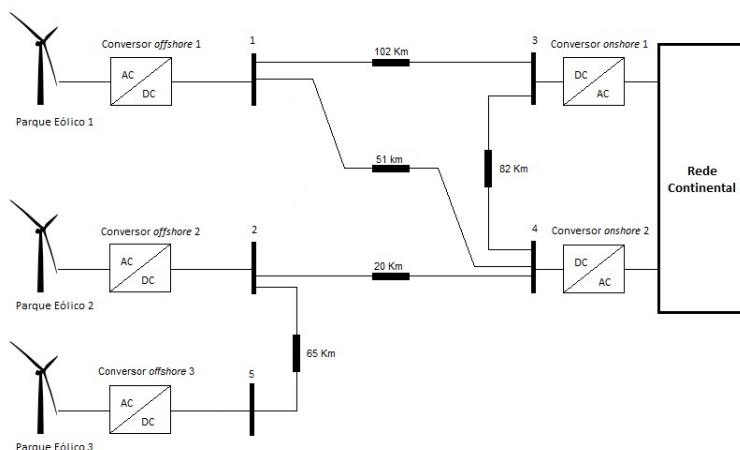


Figura 5.1: Esquema da segunda rede de transmissão DC utilizada neste trabalho, adaptada de [22].

Para as simulações realizadas, considerou-se uma base de potência de  $300MW$  e uma tensão de base de  $300kV$ . Do lado de produção offshore os conversores 1, 2 e 3 têm uma potência nominal de  $1440MW$ ,  $792MW$  e  $510MW$  respetivamente. No lado da rede continental o conversor 1 tem uma potência nominal de  $1320MW$  e o conversor 2 de  $1500MW$ . A informação referente aos parâmetros das linhas encontra-se no apêndice A.

### 5.2.2 Diagramas de Produção e Potência Especificada

O processo de optimização das condições de operação da rede multi-terminal vai ser estudado para um período de 24 horas, tendo em conta o conhecimento de perfis de produção esperados e os perfis de despacho de injeção de potência nas redes continentais. O diagrama do perfil produção eólica é o representado na figura 5.2.

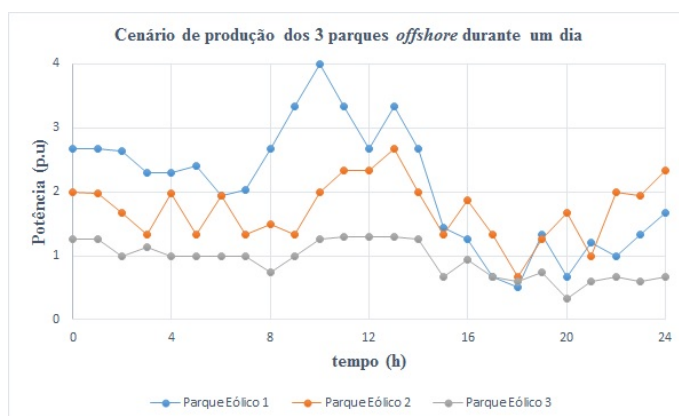


Figura 5.2: Produção eólica nos 3 parques eólicos offshore, durante um dia.

A rede 1 é constituída pelos parques eólicos 1 e 2. À rede 2 adiciona-se o parque produtor 3. Estes valores vão funcionar como valores de entrada do trânsito de potências e do algoritmo de



otimização a cada hora.

A figura 5.3 apresenta o somatório de energia produzida em cada rede e ainda os dois cenários de potência especificada no barramento 4, um constante e o outro variável.

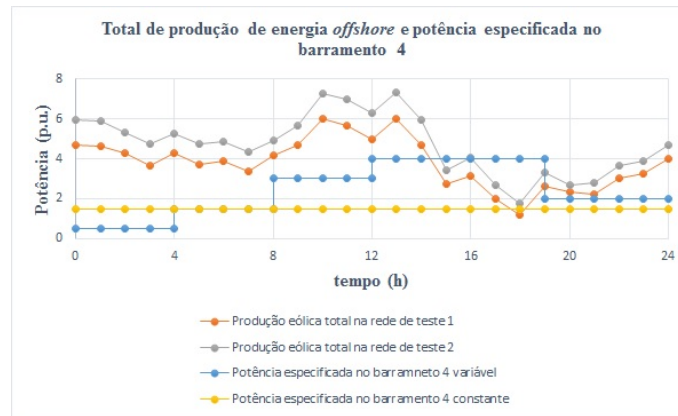


Figura 5.3: Produção de energia eólica *offshore* em cada rede e potência especificada no barramento 4.

A partir da figura é possível observar que numa situação de despacho variável em 4, desde as 15h até às 19h a produção de energia não vai ser suficiente para cobrir o valor especificado de potência. Nesse caso o barramento 3 irá fazer a compensação. Para uma situação de despacho constante, na *rede 1*, às 18h ocorre a mesma situação.

Estes casos de produção e potência especificada no barramento 4 foram utilizados nas simulações que se apresentam nas próximas secções. Realizou-se um teste para potência especificada constante e 4 para potência especificada variável.

### 5.3 Simulação com Potência Especificada no Barramento 4 Constante

A simulação para um despacho constante, durante 24h, para o barramento 4 foi efetuada na *rede 1* para uma estratégia de controlo por barramento de referência. As perdas mínimas resultantes da aplicação do algoritmo apresentam-se na tabela A.5.

Tabela 5.1: Valor mínimo das perdas, na estratégia de controlo por barramento de compensação com o valor da potência especificada no ponto 4 constante ao longo das 24h, para a *rede 1*.

tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Perdas (p.u)	0,071	0,070	0,058	0,039	0,059	0,041	0,048	0,033	0,053
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	0,068	0,121	0,109	0,085	0,127	0,071	0,022	0,033	0,014
	18	19	20	21	22	23	24		
	0,006	0,020	0,020	0,014	0,033	0,036	0,057		

O valor das perdas varia com a hora do dia pois os valores de injeção de potência nos dois parques eólicos não é sempre constante. A posição da partícula ótima, tensão no barramento 3, para cada hora do dia é representada pelo gráfico da figura 5.4.

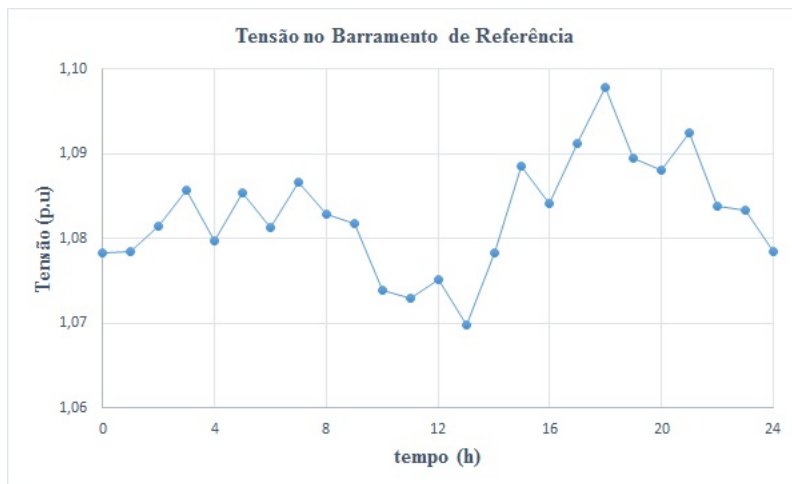


Figura 5.4: Valor ótimo da tensão de referência durante o período de 24h simulado.

No gráfico da figura 5.5 é possível observar o comportamento das restantes tensões da rede em função da posição final da tensão no barramento 3.

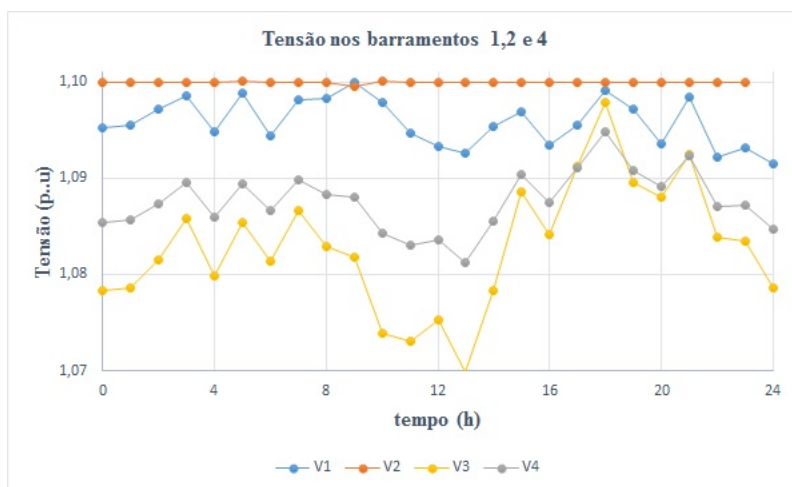


Figura 5.5: Nível de tensão ótimo nos 4 barramentos da rede durante o período de 24h simulado.

O nível de tensão *offshore* é sempre superior ao nível *onshore*, como seria expectável. Quanto aos dois barramentos onshore, o nível de tensão ótimo na referência é sempre inferior ao nível de tensão no barramento 4. Enquanto existe produção suficiente para garantir o despacho, o barramento 4 envia o excedente para o barramento de referência. Às 18h, quando os parques eólicos não produzem o suficiente para garantir o despacho em 4, o barramento de referência vai compensar esse valor, daí o nível de tensão ser superior nessa altura. Através da figura 5.6 é possível ver a evolução da potência no barramento 3.

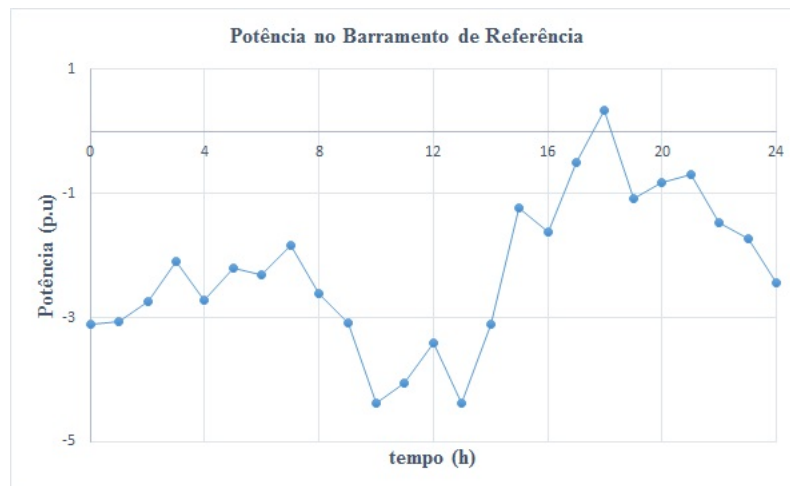


Figura 5.6: Potência no barramento de referência durante o período de 24h simulado.

Os valores negativos ocorrem quando a potência é injetada no barramento 3. Mais uma vez, nas 18h o barramento 3 passa a injetar potência na rede MTDC de forma a garantir o despacho especificado em 4. Esta situação, conforme foi possível observar na tabela A.5 representa no valor mais pequeno das perdas durante o dia. Tal facto deve-se ao barramento de referência compensar também as perdas existentes na transmissão *offshore* para *onshore*.

## 5.4 Simulação com Potência Especificada no Barramento 4 Variável

### 5.4.1 Resultados para a Estratégia de Barramento de Referência

Nesta etapa foram realizadas simulações para as duas redes de teste, com a potência especificada no barramento 4 variável. Assim é possível perceber as diferenças entre as estratégias de controlo e as duas redes utilizadas.

#### 5.4.1.1 Rede de Teste 1

Na primeira simulação, efetuada na *rede 1*, considera-se que a produção eólica nos parques 1 e 2 é variável de acordo com a hora do dia. Para esta simulação a variação das perdas evolui de acordo com a tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valor mínimo das perdas, na estratégia de controlo por barramento de compensação com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a *rede 1*.

tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Perdas (p.u)	0,089	0,087	0,073	0,050	0,075	0,041	0,048	0,033	0,053
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	0,060	0,101	0,091	0,071	0,101	0,064	0,041	0,044	0,040
	18	19	20	21	22	23	24		
	0,047	0,040	0,020	0,015	0,031	0,034	0,052		

A posição da partícula de forma a encontrar os mínimos apresentados evoluiu de acordo com o gráfico da figura 5.7.

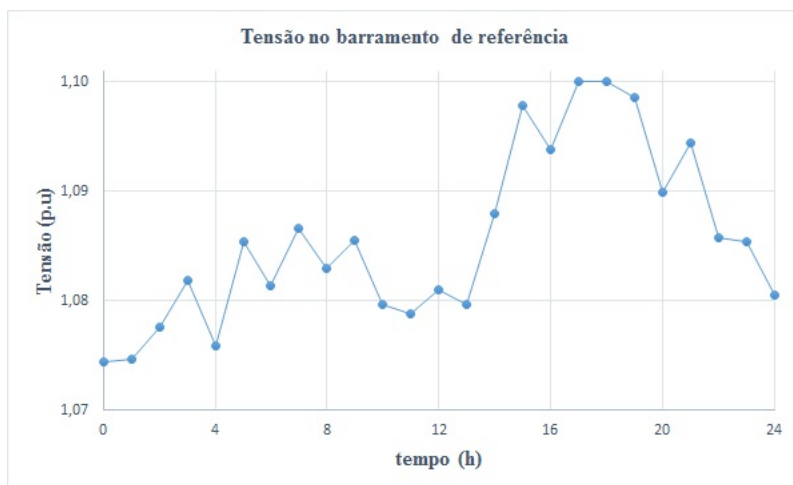


Figura 5.7: Valor ótimo da tensão de referência durante o período de 24h com potência especificada em 4 variável.

É possível observar desde já que para o intervalo onde a potência estipulada em 4 não é garantida pela produção *offshore*, o nível de tensão no barramento de referência sobe para valores muito próximos de 1,1 p.u. Através do gráfico da figura 5.8 é pode-se observar a evolução da tensão nos restantes barramentos com a posição final da tensão no barramento 3.

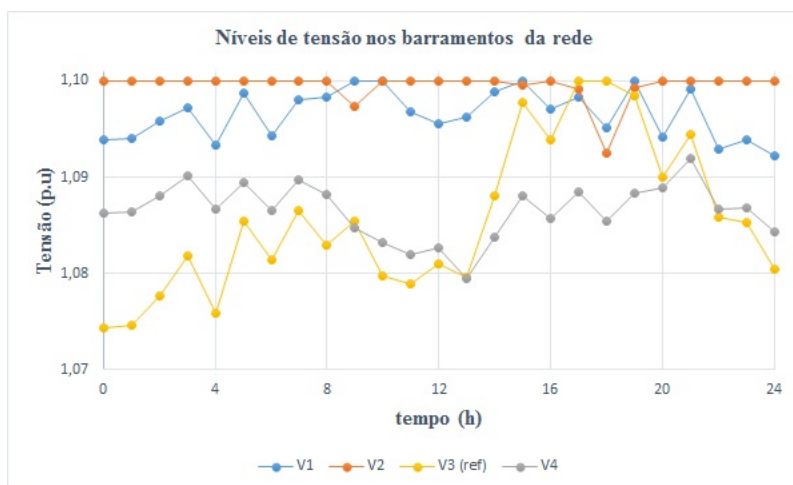


Figura 5.8: Nível de tensão nos 4 barramentos da rede durante o período de 24h com potência especificada em 4 variável.

Em certos pontos o valor da tensão no barramento de referência é superior ao valor no barramento 4. Isso significa uma inversão no sentido da corrente na linha e pode dever-se a dois factos, não haver produção eólica suficiente para garantir o valor especificado de potência no barramento 4 ou então porque a solução conduz para um ponto melhor de funcionamento, aproveitando a curta distância entre as subestações *onshore*.

A figura 5.9 apresenta o valor da potência no barramento 3 ao longo do período simulado. Como o valor das perdas é relativamente baixo em relação à potência no barramento 3, este gráfico é aproximadamente igual nas duas estratégias de controlo, para a mesma rede.

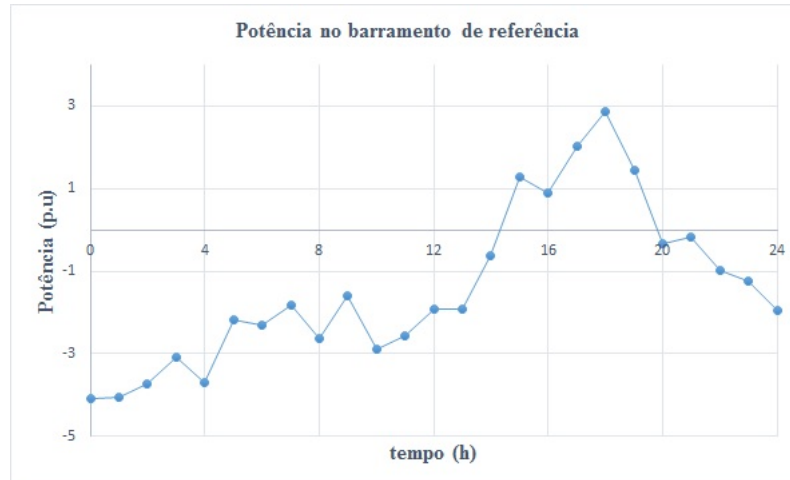


Figura 5.9: Potência no barramento de referência durante o período de 24h com potência especificada em 4 variável.

Como foi dito na secção 5.2.2, no intervalo entre as 15h e as 19h a produção de energia eólica não garante o despacho em 4 logo o barramento 3 vai compensar essa falta e vai injetar potência na rede MTDC de forma a garantir o balanço de potência na rede.

#### 5.4.1.2 Rede de Teste 2

A *rede2*, apresenta-se como uma rede mais complexa devido à adição de um novo parque produtor, onde a potência produzida também varia com a hora do dia. Para esta estratégia de controlo, o algoritmo EPSO fica facilmente retido em ótimos locais que não são pontos ótimos globais. De forma aligeirar esse efeito, realizaram-se várias simulações. Nas tabelas 5.3 e 5.4 estão presentes os valores das perdas mínimas durante 24h de funcionamento para duas das simulações efetuadas.

Tabela 5.3: Valor mínimo das perdas para a primeira simulação, na estratégia de controlo por barramento de compensação com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a *rede 2*.

tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Perdas (p.u)	0,056	0,055	0,041	0,036	0,042	0,024	0,026	0,021	0,023
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	0,024	0,045	0,042	0,034	0,038	0,024	0,009	0,011	0,009
	18	19	20	21	22	23	24		
	0,012	0,009	0,004	0,005	0,011	0,011	0,018		

Tabela 5.4: Valor mínimo das perdas para a segunda simulação, na estratégia de controlo por barramento de compensação com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a rede 2.

tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Perdas (p.u)	0,056	0,055	0,041	0,036	0,042	0,024	0,026	0,021	0,017
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	0,018	0,045	0,042	0,034	0,038	0,024	0,009	0,011	0,009
	18	19	20	21	22	23	24		
	0,012	0,009	0,002	0,005	0,011	0,011	0,017		

A segunda simulação apresenta, no geral, valores de perdas inferiores aos da primeira simulação efetuada. Isso significa que alguns pontos da primeira simulação convergiram para ótimos locais.

No gráfico da figura 5.10 é possível observar a posição final da partícula, que é a tensão no barramento 3, ao longo das 24h de funcionamento para as duas simulações.

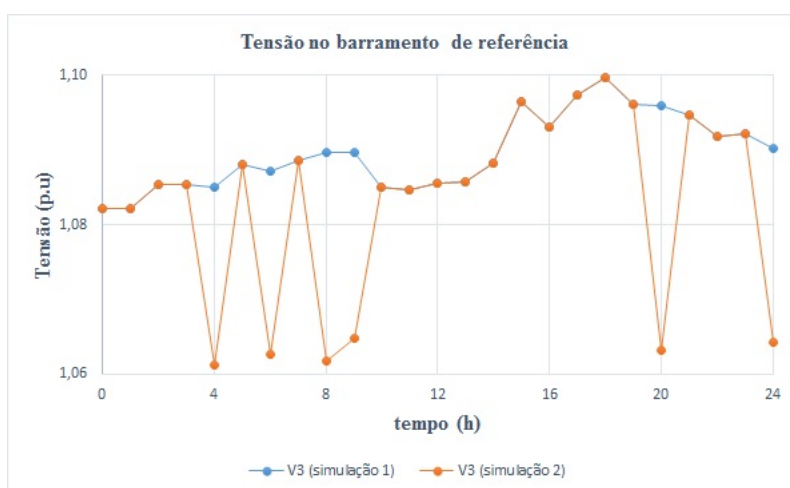


Figura 5.10: Valor ótimo da tensão de referência na rede 2 durante o período de 24h para as duas simulações efetuadas, com a potência no barramento 4 variável.

A figura 5.11 representa o valor do nível das tensões, nos restantes barramentos, para as duas simulações efetuadas.

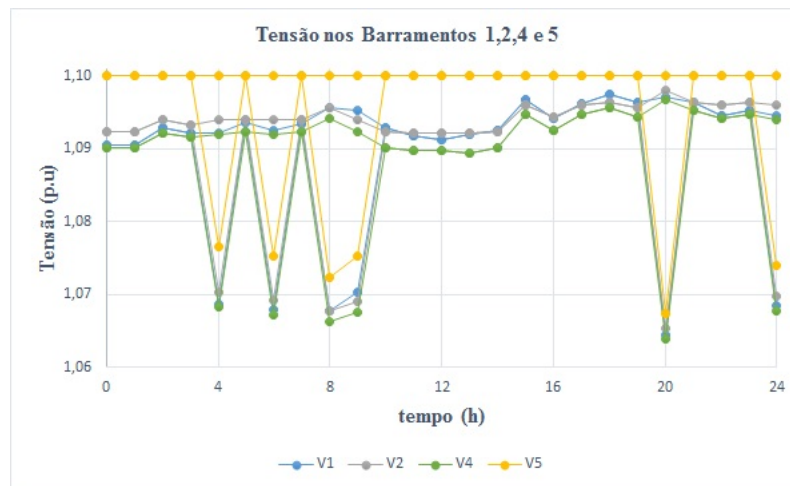


Figura 5.11: Níveis de tensão nos barramentos 1,2,4 e 5 da *rede 2* durante o período de 24h para as duas simulações efetuadas, com a potência no barramento 4 variável.

É possível observar que na segunda simulação, o nível de tensão de referência em alguns pontos diminui e com isso o nível de tensão nos restantes barramentos também. No gráfico da figura 5.12 é representada a evolução das tensões nos barramentos com o valor da tensão de referência para o melhor caso global, simulação 2.

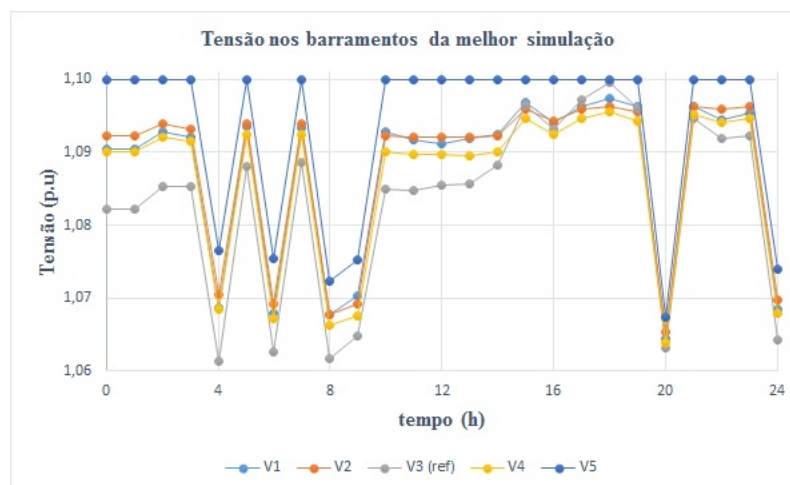


Figura 5.12: Níveis de tensão nos barramentos da *rede 2*, para a melhor simulação, durante o período de 24h, com a potência no barramento 4 variável.

No intervalo entre as 15h e as 19h, o valor da tensão em 3 é superior à do barramento 4, pois mais uma vez a produção é insuficiente para garantir o despacho no barramento 4. No entanto a diferença entre as tensões nestes barramentos é inferior, pois existe mais capacidade na rede e o barramento 3 não precisa de injetar tanta potência como na *rede 1*, figura 5.13.

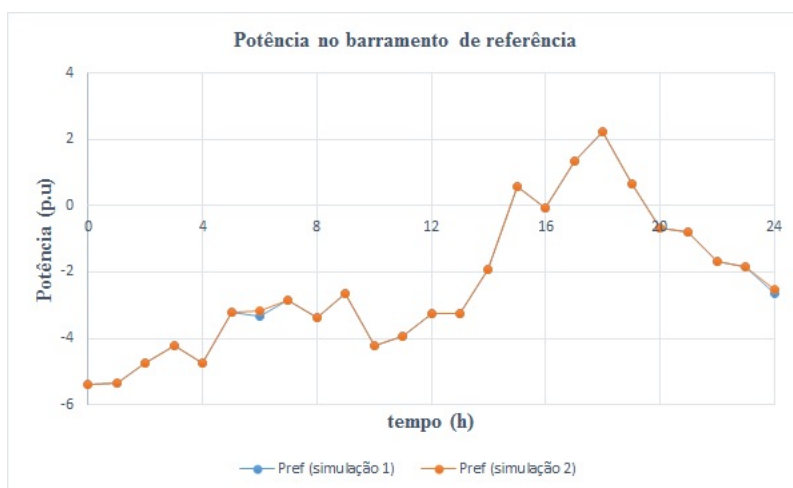


Figura 5.13: Potência no barramento 3 da rede 2 durante o período de 24h para as duas simulações efetuadas, com a potência no barramento 4 variável.

No gráfico anterior é possível observar que o valor da potência no barramento de compensação é aproximadamente igual nas duas simulações. Isso significa que os desvios do ótimo global não são assim tão grandes. A figura 5.14 representa o gráfico das perdas mínimas nas duas redes, para a estratégia de controlo por barramento de referência. Para a rede2 utilizou-se a simulação 2 por representar os melhores resultados globais obtidos.

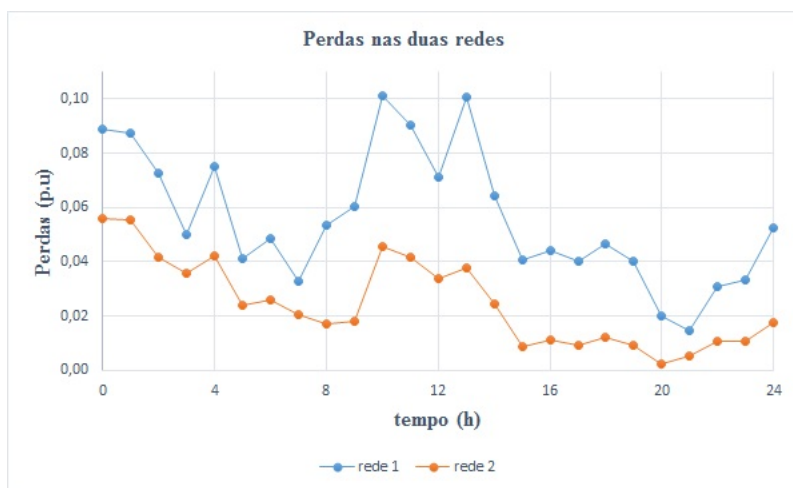


Figura 5.14: Comparação entre os valores ótimos das redes 1 e 2 durante o período de 24h e para a estratégia de controlo por Barramento de Compensação, com a potência no barramento 4 variável.

A rede 2 pode ser mais complexa do que a rede 1 mas apresenta um valor de perdas inferior em todos os momentos. Isso deve-se à distância entre os pontos de transmissão. A rede 1 é uma rede mais longa, na distância entre parques onshore e offshore e tal facto reflete-se no valor das perdas, que aumentam com a distância e potência a transmitir.



## 5.4.2 Resultados para a Estratégia de Controlo *Droop* de Tensão

### 5.4.2.1 Rede de Teste 1

Na estratégia de controlo *droop*, as partículas utilizadas vão ser os valores de referência presentes na equação 3.11 que definem a tensão nos barramentos onshore. Nesta equação existe um parâmetro dinâmico,  $k$ , que define a inclinação da função *droop* e depende do valor do desvio máximo de tensão admissível e da potência nominal do conversor. As partículas vão variar o seu valor entre o intervalo de soluções admissíveis e vão encontrar o valor mínimo das perdas na rede.

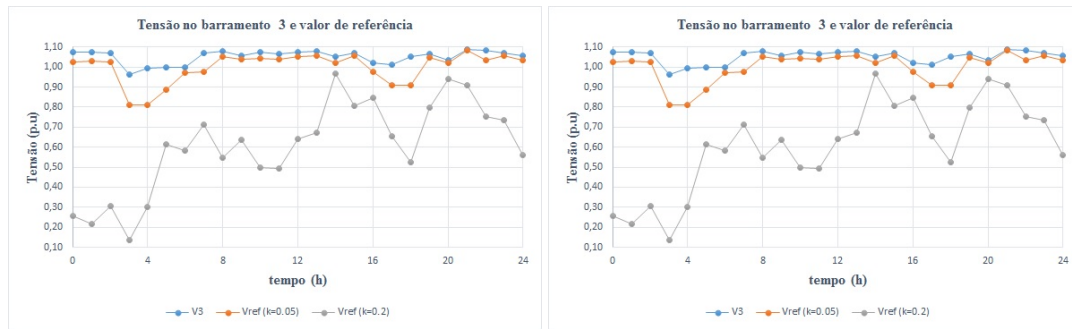
O facto de a simulação de controlo *droop* possuir duas partículas aliado à existência de mais duas equações a respeitar no trânsito de potência tornam este algoritmo muito mais pesado o que se reflete no tempo de simulação.

Nesta fase foram realizadas duas simulações para valores de  $k$  diferentes, 5% e 20% respetivamente. O objetivo é perceber a influência que este parâmetro vai ter no nível de tensão nos barramentos 3 e 4. Na tabela 5.5 estão representados os valores das perdas para os diferentes valores de  $k$  utilizados.

Tabela 5.5: Valor mínimo das perdas na estratégia de controlo *droop* de tensão nos barramentos 3 e 4, com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a rede 1.

tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Perdas (p.u)	0,089	0,087	0,074	0,063	0,087	0,049	0,056	0,034	0,054
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	0,063	0,102	0,092	0,072	0,101	0,069	0,043	0,051	0,048
	18	19	20	21	22	23	24		
	0,051	0,043	0,022	0,015	0,031	0,035	0,055		

Como é possível observar foram obtidos resultados iguais para as duas simulações. Este resultado era expectável, mas não uma regra, visto que com uma constante  $k$  de 20% ainda é possível encontrar valores para a tensão de referência de forma a obter os mesmos níveis de tensão nos barramentos 3 e 4. Os gráficos da figura 5.15 ajudam a perceber esse fenómeno.



(a) Valor da tensão no barramento 3 e respetivo parâmetro de referência, para a estratégia de controlo *droop* de tensão durante o período de 24h, para a rede 1. (b) Valor da tensão no barramento 4 e respetivo parâmetro de referência, para a estratégia de controlo *droop* de tensão durante o período de 24h, para a rede 1.

Figura 5.15: Resultados obtidos para os níveis de tensão nos barramentos 3 e 4 controlados por *droop* durante o período de 24h, para a rede 1.

Como nível de tensão nos barramentos controlados por *droop* manteve-se igual, o valor nos restantes também se manteve, logo as duas simulações apresentarem valores iguais de perdas mínimas. O único aspeto que variou nas duas simulações foi o valor de  $V_{ref}$  que teve de tomar valores inferiores com o aumento da constante  $k$ . Quanto maior o valor da constante  $k$ , maior será a influência da potência no barramento na equação de controlo *droop*. Logo com o seu aumento a variável de referência da equação tem de procurar valores mais baixos para manter o mesmo nível de tensão no barramento. Contudo valores de  $k$  muito acima de 20% são irrealistas e provocam violações no trânsito de potências.

As tensões nos restantes barramentos evoluíram conforme o valor da tensão do barramento 4, de acordo com o gráfico da figura 5.16.

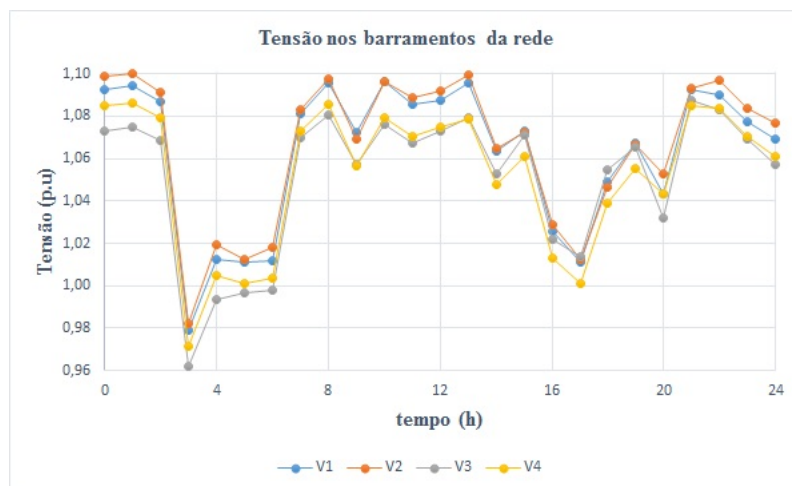


Figura 5.16: Níveis de tensão nos barramentos da rede 1, para a estratégia de controlo *droop* de tensão nos barramentos *onshore* durante o período de 24h, com a potência no barramento 4 variável.

Como na estratégia anterior, o barramento 3, agora controlado por *droop* de tensão, vai servir

para equilibrar o balanço de potência na rede. Assim sendo quando a produção de energia eólica não é suficiente para garantir a potência especificada em 4, os níveis de tensão em 3 sobem e o trânsito entre estes barramentos inverte o sentido. Agora como se controla dois barramentos pela equação *droop*, o espaço de soluções possíveis diminui.

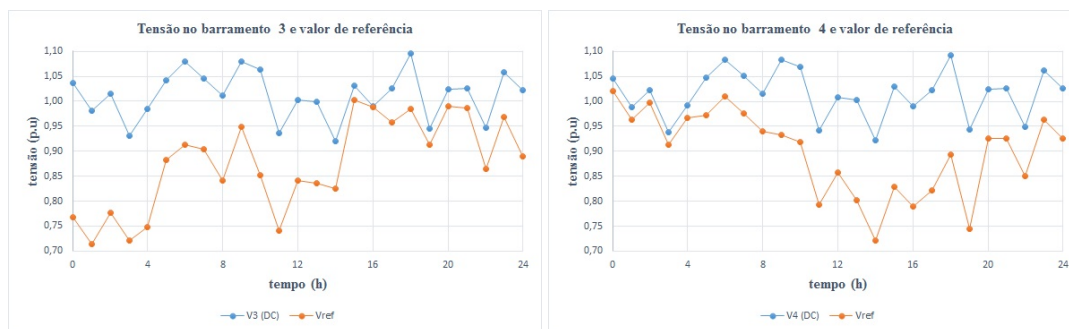
#### 5.4.2.2 Rede de Teste 2

Para a *rede 2* utilizam-se os mesmos parâmetros que foram utilizados para a *rede 1* mas agora apenas se realizou uma simulação para um valor da constante  $k$  de 5%. O algoritmo EPSO correu da mesma forma só que agora o trânsito de potência faz-se com mais um barramento de produção eólica. As partículas continuam a ser os valores de referência da equação 3.11 de controlo *droop* nos barramentos 3 e 4. O valor das perdas para as duas situações é apresentado na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Valor mínimo das perdas na estratégia de controlo *droop* de tensão nos barramentos 3 e 4, com o valor da potência especificada no ponto 4 variável ao longo das 24h, para a *rede 2*.

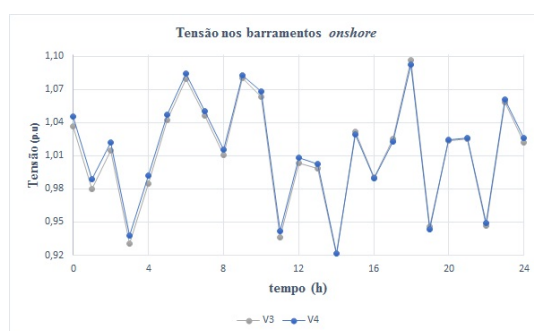
tempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Perdas (p.u)	0,061	0,067	0,047	0,048	0,051	0,026	0,027	0,022	0,027
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	0,024	0,047	0,055	0,040	0,045	0,034	0,010	0,014	0,011
	18	19	20	21	22	23	24		
	0,012	0,012	0,004	0,006	0,014	0,012	0,020		

O valor das tensões *offshore*, assim como o valor de referência das respetivas equações de controlo *droop* são representados na figura 5.17.



(a) Valor da tensão no barramento 3 e respetivo parâmetro de referência, para a estratégia de controlo *droop* de tensão durante o período de 24h, para a rede 2.

(b) Valor da tensão no barramento 4 e respetivo parâmetro de referência, para a estratégia de controlo *droop* de tensão durante o período de 24h, para a rede 2.



(c) Valor da tensão no barramento 3 4, para a estratégia de controlo *droop* de tensão durante o período de 24h, para a rede 2.

Figura 5.17: Resultados obtidos para os níveis de tensão nos barramentos 3 e 4 controlados por *droop* durante o período de 24h, para a rede 2.

No início da simulação, enquanto a potência especificada em 4 é reduzida, o valor da variável de referência em 3 assume um valores pequenos enquanto no barramento 4 assume um valores muito próximos no nível da tensão. Isto deve-se ao facto de o barramento 3 ter mais potência injetada do que a injetada em 4, de forma a fazer o balanço de potências na rede. Assim o valor de referência terá procurar em 3 níveis inferiores e em 4 níveis superiores, para garantir um nível de tensão que minimize as perdas. Com o decorrer do tempo de simulação a potência especificada em 4 aumenta, logo o peso desta parcela na equação *droop* de tensão é superior. Como resposta o valor de referência terá de procurar valores inferiores.

Os níveis de tensão nos barramentos *onshore* apresentam valores muito próximos como foi possível observar com gráfico da figura 5.17(c). Mesmo assim é possível perceber a inversão no sentido do trânsito de potência entre estes dois barramentos quando a potência especificada em 4 não é garantida pela produção.

Na figura 5.18 é possível observar a evolução das tensões nos restantes barramentos de acordo com a tensão no barramento 4.

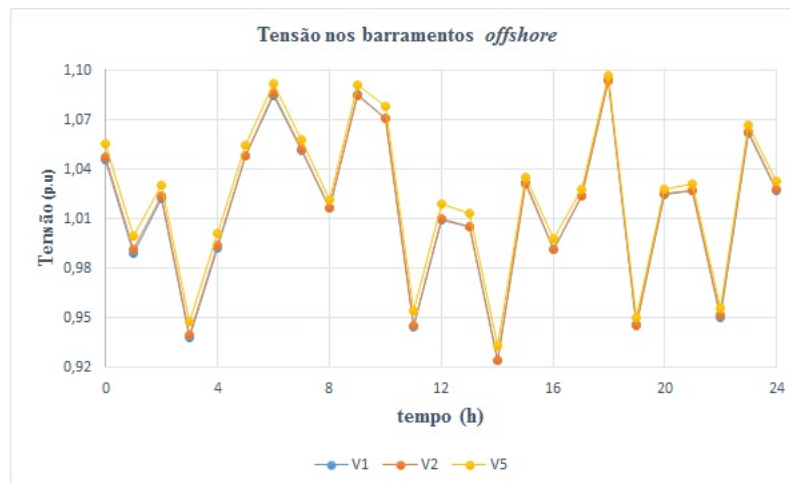


Figura 5.18: Níveis de tensão nos barramentos 1,2 e 5 da rede 2, para a estratégia de controlo *droop* de tensão nos barramentos *onshore* durante o período de 24h, com a potência no barramento 4 variável.

O nível de tensão no barramento 5 é o mais elevado da rede, em quase todos os momentos. Isso explica-se porque o parque eólico 5 só está ligado a outro parque eólico, portanto envia toda a energia que produz e não serve como passagem de energia vinda de outros barramentos. O nível de tensão nos barramentos 1 e 2 é praticamente o mesmo o que se justifica porque não existe uma ligação entre estes dois barramentos. A proximidade dos níveis de tensão nesta simulação é muito grande.

O gráfico da figura 5.19 compara o valor das perdas para as duas redes onde o algoritmo de minimização foi simulado.

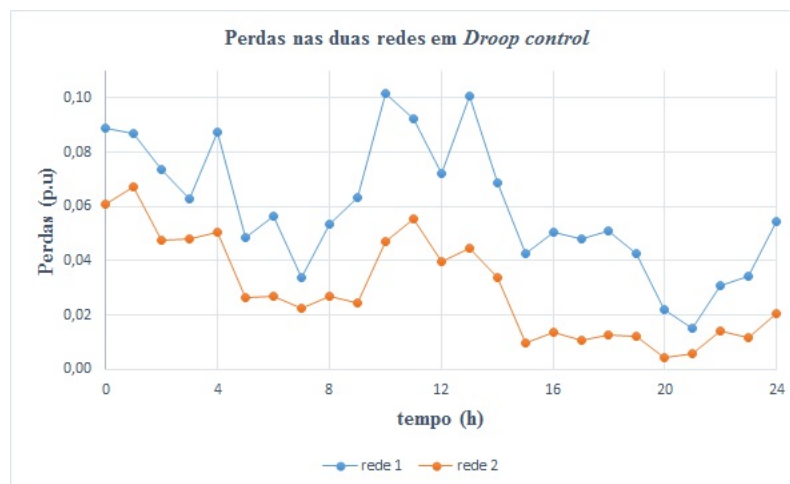


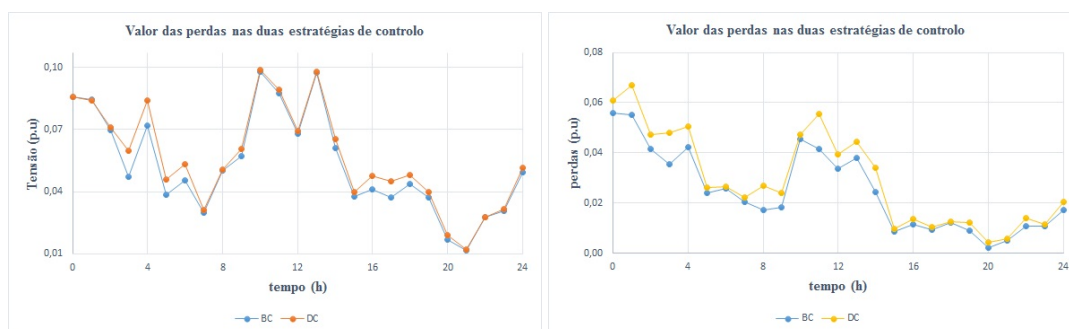
Figura 5.19: Comparação entre os valores ótimos das redes 1 e 2 durante o período de 24h e para a estratégia de controlo *droop* de tensão, com a potência no barramento 4 variável.

O valor das perdas é superior, nas horas de maior produção nos parques eólicos. Mais uma vez o gráfico mostra que as perdas na rede 2, onde os pontos *offshore* e *onshore* são mais próximos,

são inferiores.

### 5.4.3 Comparação entre as duas Estratégias de Controle

Nas duas redes testadas a estratégia de controlo por barramento de compensação obteve valores de perdas inferiores, não muito distantes dos valores obtidos na estratégia por controlo *droop* de tensão. A evolução das perdas nas duas redes para cada uma das estratégias pode ser observada nos gráficos da figura 5.20.



(a) Comparação entre o valores mínimo das perdas das estratégias de controlo, por Barramento de Compensação (BC) e controlo *Droop* da tensão (DC), ao longo de 24h para a rede 1.

(b) Comparação entre o valores mínimo das perdas das estratégias de controlo, por Barramento de Compensação (BC) e controlo *Droop* da tensão (DC), ao longo de 24h para a rede 2.

Figura 5.20: Comparação das perdas nas duas estratégias de controlo para cada uma das redes de teste.

Na estratégia por barramento de compensação a tensão no barramento 3 serve como referência para as restantes tensões na rede. No algoritmo de otimização a partícula referente a essa tensão vai escolher o valor mais alto que conseguir, sem infringir as restrições na rede, elevando o nível de tensão em relação à estratégia por barramento *droop*. Os gráficos da figura 5.21 servem para mostrar o nível médio de tensão na rede ao longo processo de otimização.



(a) Comparação entre o valores médios das tensões nas duas estratégias de controle, por Barramento de Compensação (BC) e controle *Droop* da tensão (DC), ao longo de 24h para a rede 1.

(b) Comparação entre o valores médios das tensões nas duas estratégias de controle, por Barramento de Compensação (BC) e controle *Droop* da tensão (DC), ao longo de 24h para a rede 2.

Figura 5.21: Comparação os níveis médios de tensão nas duas estratégias de controle para cada uma das redes de teste.

Como é possível observar, o nível médio de tensão na estratégia de controle por barramento de compensação é superior nas duas redes em relação à estratégia de controle por *droop*. Isto reflete-se nas perdas do sistema, diminuindo o seu valor.

No modo de controle por barramento de compensação o perfil de tensão tende a ser sempre superior visto que é regulado só num ponto que serve como referência do sistema. Se o conversor que está a servir de referência tiver um problema, toda a rede é desligada pois nenhum dos outros assume o controlo da tensão. No modo de controle *droop* da tensão, nas redes simuladas, existem dois barramentos que controlam a tensão da rede. Se um deles se perder, o outro assume a função e a rede continua a funcionar. Do ponto de vista de fiabilidade da rede, a solução de controlo *droop* de tensão assume-se como a mais vantajosa, mesmo que o valor das perdas em controlo por barramento de referência seja relativamente inferior.





## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1 Conclusões

Dada a necessidade de aumentar a capacidade de energia renovável, em especial energia eólica, é necessário procurar novas alternativas de construção e parques eólicos *offshore* surgem como um passo importante a ser adotado. Desse modo é importante perceber o princípio de funcionamento das redes MTDC e compreender os seus mecanismos de controlo *onshore*.

Os objetivos propostos para a dissertação foram alcançados com êxito através dos resultados experimentais. Foram utilizadas duas redes MTDC de teste que diferiam no número de parques eólicos que dispunham. Ambas as redes tinham conversores *onshore* e *offshore*.

Os conversores do lado da rede AC continental controlavam os níveis de tensão através de duas estratégias, controlo por barramento de referência e controlo *droop* de tensão.

O problema trânsito de potências em regime permanente para uma rede DC é diferente do problema em AC. Os elementos indutivos e capacitivos do modelo das linhas são desprezáveis e isso faz com que a matriz das admitâncias contenha apenas elementos resistivos. Esta alteração torna o problema de trânsito de potências mais simples, passando a ser calculado através da diferença entre as tensões dos barramentos. Devido ao facto do problema ser não linear, foi utilizado o método iterativo de *Gauss Seidel* na sua resolução.

Na estratégia de controlo por barramento de referência existe um barramento que controla o nível de tensão dos restantes através de um valor de tensão de referência escolhido. Em controlo *droop* o nível de tensão é estipulado de maneira diferente. Cada conversor do lado AC continental é controlado por um estatismo que relaciona um valor referência de tensão, escolhido, com a potência ou corrente injetada no barramento.

Nesta dissertação utilizou-se o valor da potência injetada no barramento para a equação *droop* referente a cada conversor *onshore*. O problema de trânsito de potências em regime permanente para esta situação ficou mais complicado de resolver, visto que à equação referente a cada nó da rede MTDC é necessário adicionar mais as equações de controlo *droop* alusivas a cada barramento *onshore*. O problema pode apresentar certas soluções fisicamente impossíveis e passa a funcionar para um número mais restrito de cenários visto que é desconhecido o valor das perdas no sistema.

Nas redes MTDC testadas, um conversor vai ter um valor estipulado de potência e o outro vai servir como barramento de compensação, injetando ou absorvendo potência na rede de acordo com as necessidades.

O problema de otimização foi resolvido recorrendo a um método evolucionário, EPSO, que permitiu através da clonagem sucessiva das partículas, chegar a um valor ótimo global para cada situação.

Quando a estratégia de controlo adotada foi a de barramento de referência, a partícula de controlo foi a tensão no barramento que servia de referência à rede MTDC. A função objetivo era constituída por uma parcela que calculava o valor das perdas na rede e mais duas que garantiam que os limites das linhas e tensões fossem respeitados.

Na estratégia de controlo *droop* de tensão foram utilizadas como variáveis de controlo do problema de otimização os valores de referência da equação *droop* de cada conversor do lado AC continental. De forma a afastar o processo de eventuais desvios de potência em relação ao valor especificado foi acrescentada à função objetivo uma parcela que garantia que o valor de potência num dos barramentos *onshore* não fosse diferente do valor especificado.

Nas simulações efetuadas para a estratégia de controlo *droop* de tensão observou-se que com o aumento da constante  $k$  da equação *droop*, o valor de referência, de forma a compensar o aumento da constante, procurava valores inferiores de forma a atingir os mesmos níveis de tensão ótimos. A mesma situação se verificou nas alturas do dia em que a potência no barramento *onshore* aumentava.

Os níveis de tensão obtidos na estratégia de controlo por barramento de referência foram mais elevados e isso refletiu no valor das perdas na rede, que foram inferiores para esta estratégia.

Mesmo que a equação *droop* permita elevar o nível de tensão acima de uma certa referência, os níveis de tensão nesta estratégia mantiveram-se inferiores, aumentando ligeiramente o valor das perdas em relação à outra alternativa de controlo. A justificação para tal ocorrência prende-se com o facto de na estratégia de controlo por barramento de referência, o perfil de tensão ser apenas regulado num ponto, conseguindo dessa forma elevar o nível de tensão. Na estratégia de controlo *droop* existem, neste caso, dois nós que controlam a tensão.

Ainda assim conclui-se que mesmo apresentando valores de perdas relativamente superiores, a estratégia de controlo *droop* permite que existam mais conversores disponíveis para controlar a tensão na rede MTDC. Em caso de indisponibilidade de um dos conversores, outro poderá assumir a sua função e a continuidade de serviço na rede é garantida. Tal não acontece quando os conversores do lado AC continental são controlados através de um barramento de referência. Nesta estratégia se o conversor que serve de referência se perder, toda a rede é desligada.

Assim, do ponto de vista de fiabilidade e controlo de redes MTDC, a estratégia de controlo *droop* de tensão é a melhor solução a ser implementada.

Concluindo, os objetivos propostos na dissertação foram cumpridos com êxito, percebendo-se em primeiro lugar as vantagens da transmissão DC para longas distâncias a nível das perdas e equilíbrio dos níveis de tensão na rede. Compreendeu-se ainda a utilidade das redes MTDC em termos de fiabilidade e flexibilidade de operação, principalmente quando os conversores *onshore*

são controlados pela estratégia de *droop* de tensão. Esta estratégia de controlo permite que vários conversores ligados às redes AC continentais estejam disponíveis para controlar o nível de tensão na rede.

## 6.2 Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido teve em consideração a operação da rede em regime estacionário. Importa agora desenvolver modelos mais detalhados e avaliar as condições de estabilidade em regimes dinâmicos quando a rede opera segundo as estratégias propostas.

Será da maior utilidade para o futuro desenvolver uma ferramenta de suporte a operação de redes MTDC que tenha em consideração os princípios aqui estudados.

Por fim, seria importante desenvolver estratégias globais de melhoria de condições de operação de redes DC e AC de forma integrada.



# Referências

- [1] Conselho de Ministros Português. Plano Nacional de Ação para Energias Renováveis. *Diário Da República*, nº 70, 2013.
- [2] Dr.Nicolas Fichaux e Justin Wilkes. Oceans of Opportunity. *European Wind Energy Association*, 2009.
- [3] Thomas Ackermann. *Wind power in power systems*. Royal Insitute of Technology, Stockholm- Sweden, 2005.
- [4] Dennis Mcginn, David Green, Rainer Hinrichs-rahlwes, Steve Sawyer, Marietta Sander, Richard Taylor, Irene Giner-reichl, Sven Teske, Harry Lehmann, e David Hales. RenewableS 2013 GLOBAL STATUS REPORT 2013. *REN 21*, 2013.
- [5] Frede Blaabjerg e K Ma. Future on power electronics for wind turbine systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected topics in Power Electronics*, 1(3):139–152, 2013.
- [6] ENEOP - Eólicas de Portugal. [www.eneop.pt](http://www.eneop.pt), 2014.
- [7] Giorgio (EWEA) Corbetta, Iván (EWEA) Pineda, e Jacopo (EWEA) Moccia. The European offshore wind industry - key trends and statistics 2013. *European Wind Energy Association*, (January), 2014.
- [8] Jan De Decker e Paul Kreutzkamp. Offshore Electricity Grid Infrastructure in Europe, Final Report. *OffshoreGrid*, (October), 2011.
- [9] Joao Gonçalo. Projeto WindFloat. *XIX Congresso da Ordem dos Engenheiros*, 2012.
- [10] Marco Liserre e R Cardenas. Overview of multi-MW wind turbines and wind parks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4):1081–1095, 2011.
- [11] BJL Tavares. *Parques Eólicos Offshore: Estudo de soluções de interligação do tipo HVAC e HVDC*. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [12] International Cable Protection Committee. About Submarine Power Cables, 2011.
- [13] ABB. XLPE Submarine Cable Systems Attachment to XLPE Land Cable Systems - User's Guide, 2010. url:[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/badf833d6cb8d46dc1257c0b002b3702//\\$file/XLPE+Submarine+Cable+Systems+2GM5007+.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/badf833d6cb8d46dc1257c0b002b3702//$file/XLPE+Submarine+Cable+Systems+2GM5007+.pdf).
- [14] GF Reed e HA Al Hassan. Comparison of HVAC and HVDC solutions for offshore wind farms with a procedure for system economic evaluation. *Energytech*, 2013.

- [15] Marco Gonçalves. *Capacidade de Sobrevivência a Cavas de Tensão em redes HVDC Multi-Terminal*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [16] Dr RL Sellick e M Akerberg. Comparison of HVDC Light ( VSC ) and HVDC Classic ( LCC ) Site Aspects , for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme. *IET ACDC conference*, (Lcc):1–6, 2012.
- [17] Le Tang. HVDC Technologies & ABB Experience, 2013. url:<http://new.abb.com/systems/hvdc>.
- [18] L Lazaridis. *Economic Comparison of HVAC and HVDC Solutions for Large Offshore Wind Farms under Special Consideration of Reliability*. Master's thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005.
- [19] Peter Sandeberg e Lars Stendius. Large scale offshore wind power energy evacuation by HVDC light®. *European Wind Energy Conference & Exhibition*, 2008.
- [20] Oriol Gomis-Bellmunt, Jun Liang, Janaka Ekanayake, e Nicholas Jenkins. Voltage–current characteristics of multiterminal HVDC-VSC for offshore wind farms. *Electric Power Systems Research*, 81(2):440–450, Fevereiro 2011.
- [21] Jun Liang e Tianjun Jing. Operation and control of multiterminal HVDC transmission for offshore wind farms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(4):2596–2604, 2011.
- [22] Rault Pierre. *Dynamic Modeling and Control of Multi-Terminal HVDC Grids*. Tese de doutoramento, Ecole Centrale de Lille, 2014.
- [23] Goran Andersson. *Modelling and Analysis of Electric Power Systems*. 2004.
- [24] F. Maciel Barbosa. *O Trânsito de Potências em Sistemas Elétricos de Energia*. FEUP, 2013.
- [25] Vladimiro Miranda. *Computação Evolucionária: Uma Introdução*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2.0 edição, 2005.

## Anexo A

# Dados da Rede MTDC

Este anexo serve para expor os dados de todos os componentes utilizados nas redes MTDC simuladas em *MatLab*.

### A.1 Bases do Sistema

Tabela A.1: Bases do sistema em p.u das redes MTDC.

$S_b$ (MW)	300
$V_b$ (kV)	300
$I_b$ (A)	1000
$R_b$ ( $\Omega$ )	300

### A.2 Conversores e Cabos DC

Tabela A.2: Parâmetros das estações conversoras.

	Barramento	Tensão nominal (kV)	Potência nominal (MW)
Conversor offshore 1	1	$\pm 320$	1440
Conversor offshore 2	2	$\pm 320$	792
Conversor offshore 3	5	$\pm 320$	510
Conversor onshore 1	3	$\pm 320$	1320
Conversor onshore 2	4	$\pm 320$	1500

Tabela A.3: Características físicas dos cabos.

	1 polo	2 polos
Tensão nominal (kV)	320	640
Corrente nominal (A)	1000	1000
Secção (mm <sup>2</sup> )	2500	2500

Tabela A.4: Características das linhas para a *rede 1*.

Linhas		Dimensão (km)	Resistência (1 polo)( $\Omega$ )	Resistência (2 polos)( $\Omega$ )
1	2	200	2,78	5,56
1	3	100	1,39	2,78
1	4	115	1,74	3,48
2	4	100	1,39	2,78
3	4	75	1,04	2,08

Tabela A.5: Características das linhas para a *rede 2*.

Linhas		Dimensão (km)	Resistência (1 polo)( $\Omega$ )	Resistência (2 polos)( $\Omega$ )
1	3	102	0,55	1,1
1	4	51	0,27	0,54
2	4	20	0,11	0,22
3	4	82	0,44	0,88
5	2	65	1	2